Universidad Complutense de Madrid

Nueva Estrategia Automática de Refinamientos *hp “Orientada a un Objetivo”* para la Simulación de Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos.

David Pardo Zubiaur (dzubiaur@yahoo.es),
L. Demkowicz, C. Torres Verdín, L. Tabarovsky.

Colaboradores: L.E. García Castillo, W. Rachowicz, A. Zdunek,
D. Xue, J. Kurtz, M. Paszynski, Ch. Larson.

Agradecimientos: Baker-Atlas, C. Torres Verdín.

15 de Diciembre, 2004.

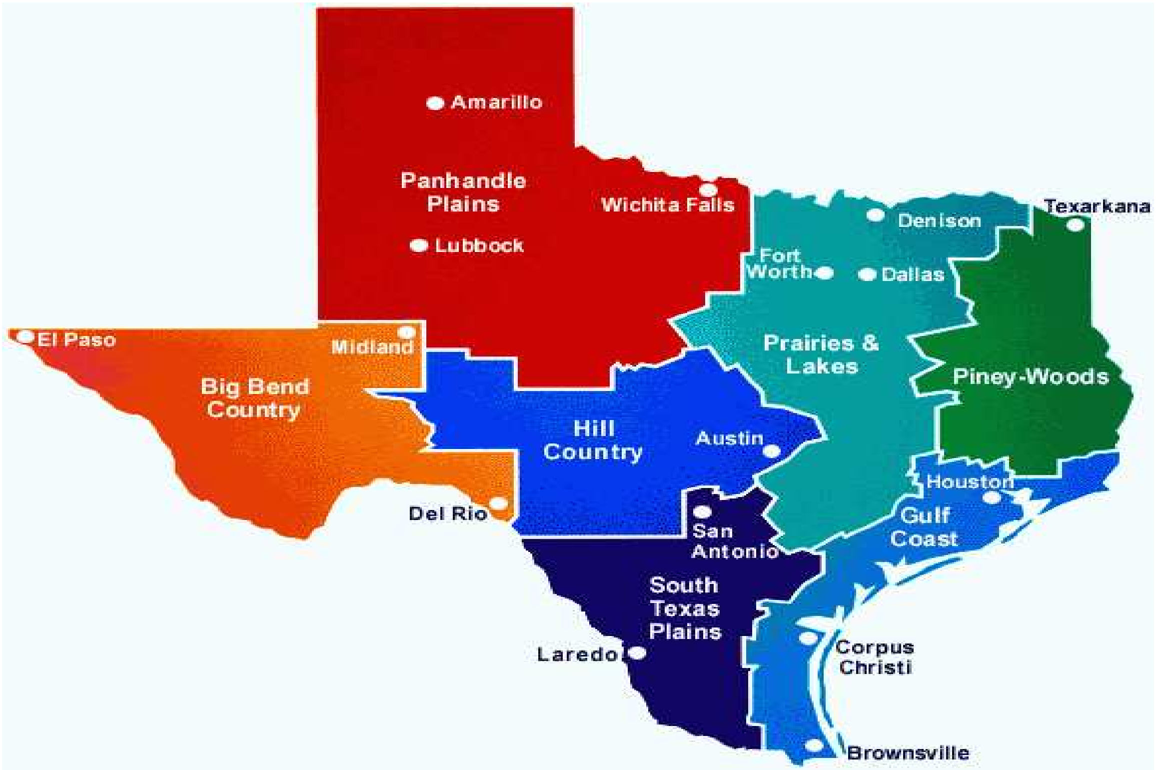
Institute for Computational Engineering and Sciences (ICES).
Universidad de Tejas en Austin.

TEMARIO

1. Universidad de Tejas en Austin.
2. Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos.
3. Electromagnetismo y Ecuaciones de Maxwell.
4. Elementos Finitos hp.
5. Estrategia de Refinamientos Automáticos en hp.
6. Resultados Numéricos Preliminares.
7. Estrategia de Refinamientos Automáticos en hp “orientada a un objetivo”.
8. Simulación de Herramientas Electromagnéticas.
9. Conclusiones.

UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

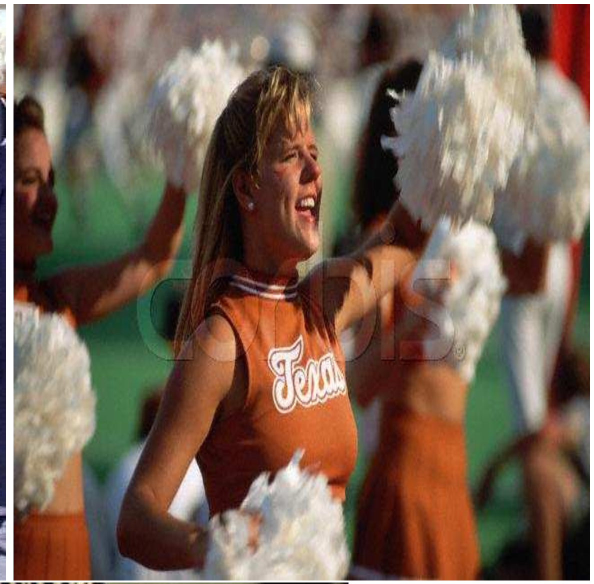
TEJAS



Everything is bigger in Texas

UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

TEJAS



UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

AUSTIN

UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

Universidad de Tejas en Austin

UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

Universidad de Tejas en Austin

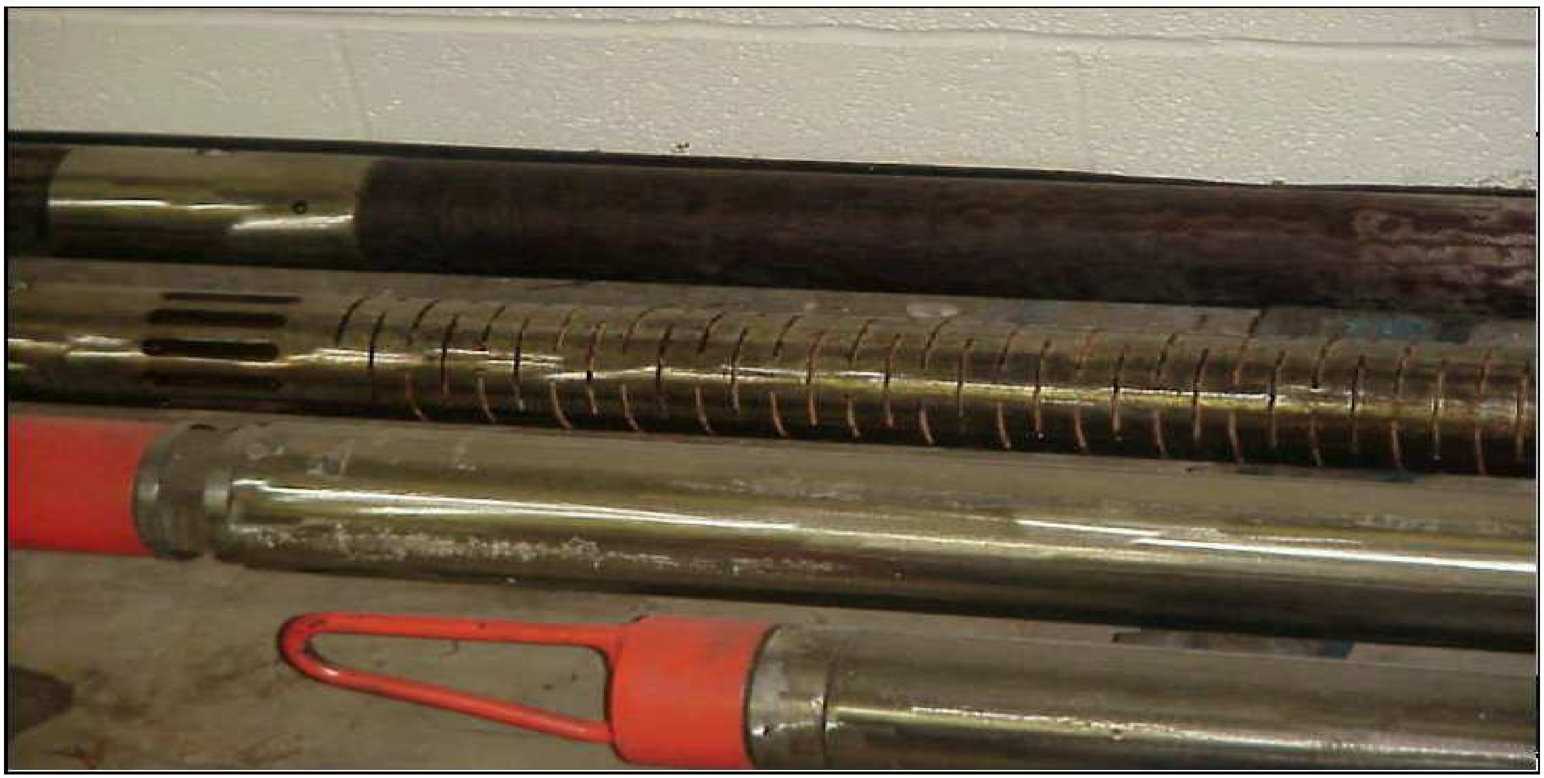
UNIVERSIDAD DE TEJAS EN AUSTIN

Institute for Computational Engineering and Sciences (ICES)

Programa Interdisciplinar

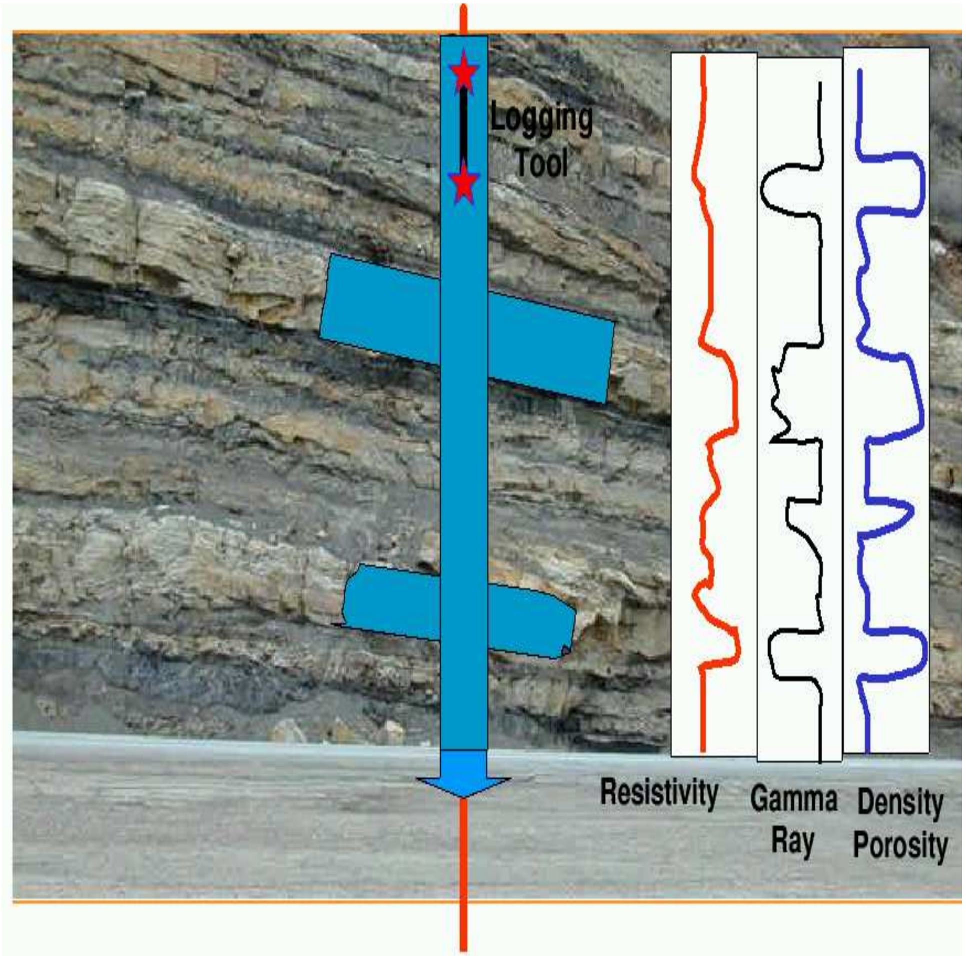
- **1/3 Matemáticas**
- **1/3 Métodos Numéricos (Informática)**
- **1/3 Ingeniería**

Herramientas de Perforación: Definición



Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos

Herramientas de Perforación: Utilidad



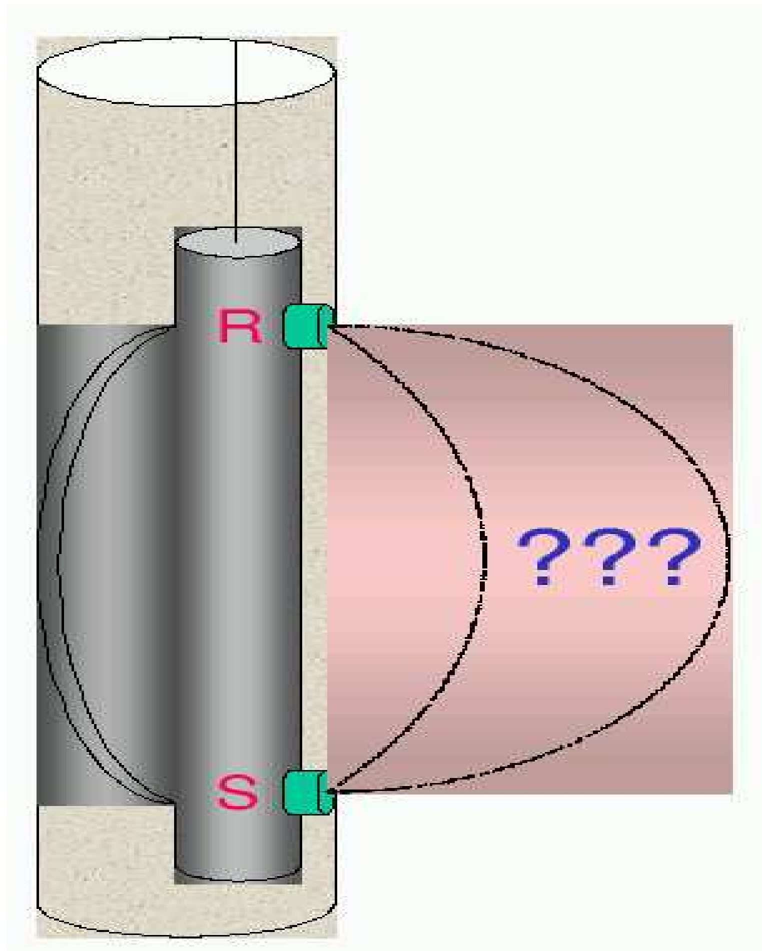
OBJETIVOS: Determinar

- **Zonas con Petróleo/Gas.**
- **Cantidad de Petróleo/Gas.**
- **Capacidad de extracción de Petróleo/Gas.**

$

Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos

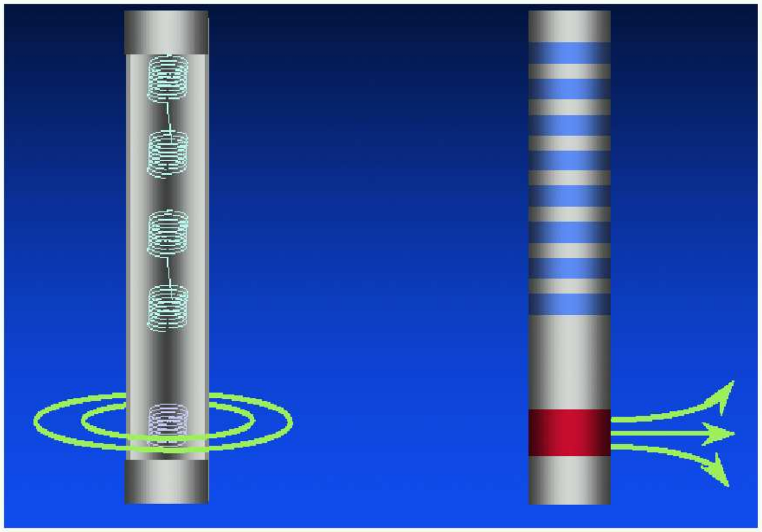
Objetivo Principal: Resolver un Problema Inverso



Software pare resolver el problema DIRECTO es esencial para resolver el problema INVERSO.

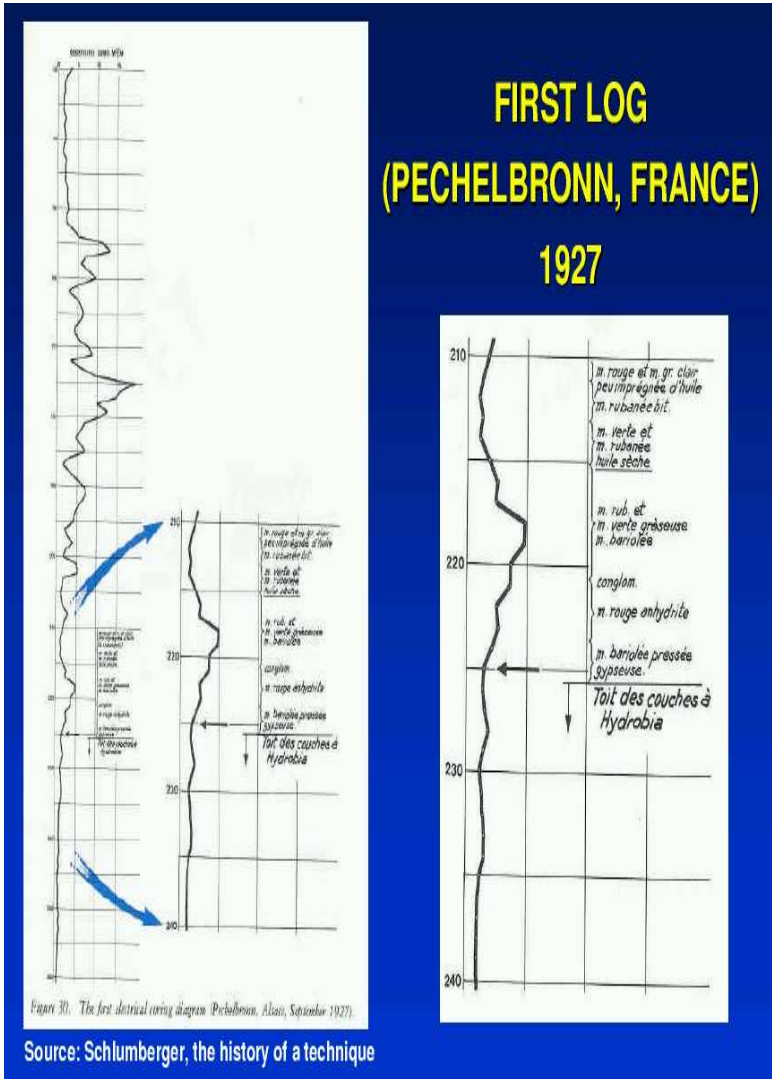
Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos

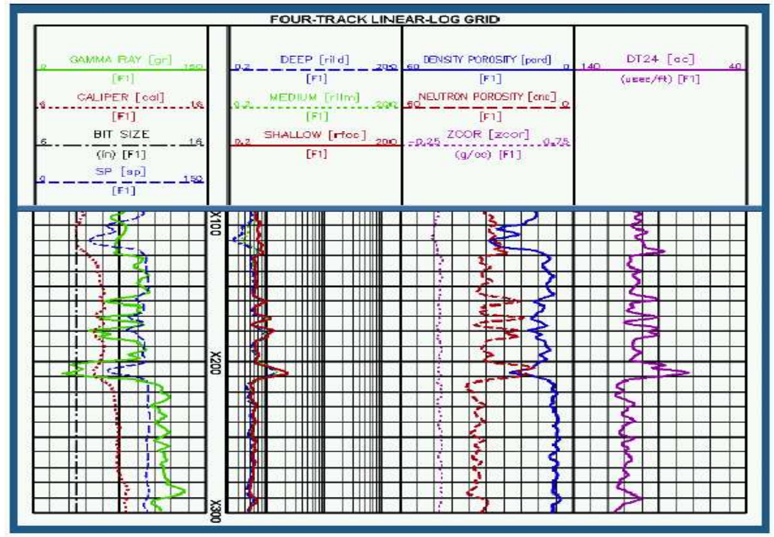
Herramientas de Resistividad

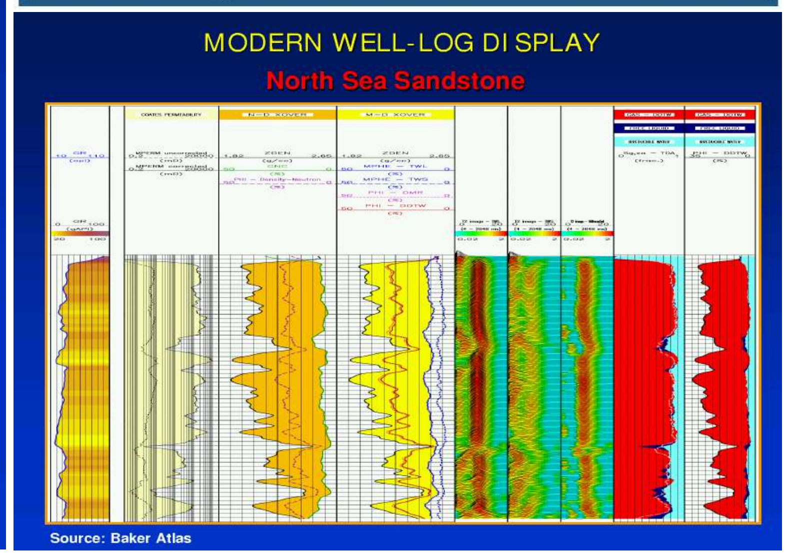


Herramientas Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos

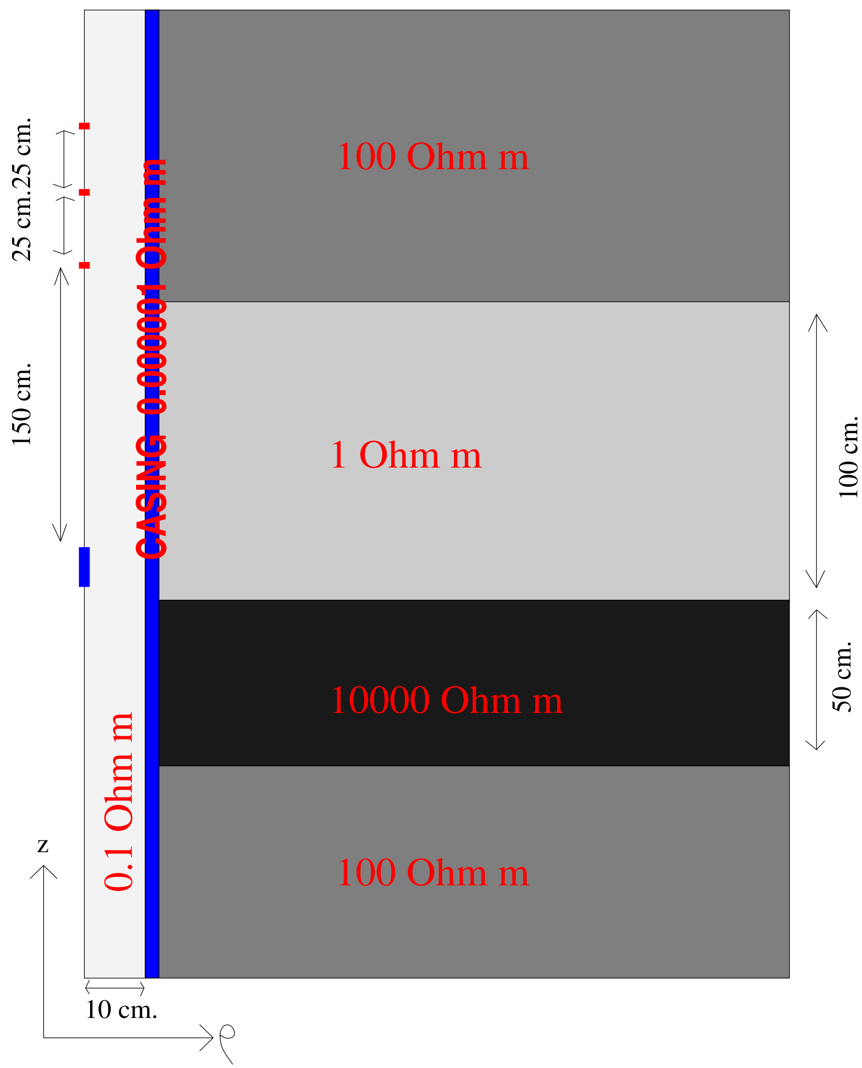
Resultados producidos por distintas herramientas de medición







Herramientas Electromagnéticas con una Tubería Metálica Rodeando al Pozo



Problema con simetría axial.

Cinco materiales diferentes.

Dominio computacional: VARIOS KILÓMETROS.

Resistividad de los materiales varía en DIEZ órdenes de magnitud (10000000000!!!).

Objetivo: Determinar segunda diferencia de potencial en los electrodos receptores.

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = (\sigma - j\omega\epsilon)\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = (j\omega\mu\epsilon)\mathrm{H} \ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ , \end{cases}$$

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Ecuaciones de Maxwell: **Frecuencia = 0 Hz:**

$$\left\{\begin{array}{l} \nabla \times \mathrm{H} = (\sigma - j\omega\epsilon)\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = (j\omega\mu\epsilon)\mathrm{H}\ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho\ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0\ , \end{array}\right. \quad \overset{\omega=0}{\Longrightarrow} \quad \left\{\begin{array}{l} \nabla \times \mathrm{H} = \sigma\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = 0\ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho\ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0\ . \end{array}\right.$$

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Ecuaciones de Maxwell: **Frecuencia = 0 Hz:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = (\sigma - j\omega\epsilon)\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = (j\omega\mu\epsilon)\mathrm{H} \ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ , \end{cases} \quad \stackrel{\omega=0}{\Longrightarrow} \quad \begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = \sigma\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = 0 \ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ . \end{cases}$$

$\nabla \times \mathrm{E} = 0$ **implica** $\mathrm{E} = -\nabla\Psi$ **para algún potencial** Ψ**:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = -\sigma\nabla\Psi + \mathrm{J} \\ -\nabla \cdot \epsilon\nabla\Psi = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ . \end{cases}$$

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Ecuaciones de Maxwell: **Frecuencia = 0 Hz:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = (\sigma - j\omega\epsilon)\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = (j\omega\mu\epsilon)\mathrm{H} \ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ , \end{cases} \quad \overset{\omega=0}{\Longrightarrow} \quad \begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = \sigma\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = 0 \ , \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ . \end{cases}$$

$\nabla \times \mathrm{E} = 0$ **implica** $\mathrm{E} = -\nabla\Psi$ **para algún potencial** Ψ**:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = -\sigma\nabla\Psi + \mathrm{J} \\ -\nabla \cdot \epsilon\nabla\Psi = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ . \end{cases} \quad \overset{\nabla \circ}{\Longrightarrow} \quad \begin{cases} -\nabla \cdot \sigma\nabla\Psi = \nabla \cdot \mathrm{J} \ , \\ -\nabla \cdot \epsilon\nabla\Psi = \rho \ , \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \ . \end{cases}$$

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Ecuaciones de Maxwell: **Frecuencia = 0 Hz:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = (\sigma - j\omega\epsilon)\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = (j\omega\mu\epsilon)\mathrm{H} \;, \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \;, \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \;, \end{cases} \quad \overset{\omega=0}{\Longrightarrow} \quad \begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = \sigma\mathrm{E} + \mathrm{J} \\ \nabla \times \mathrm{E} = 0 \;, \\ \nabla \cdot \epsilon\mathrm{E} = \rho \;, \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \;. \end{cases}$$

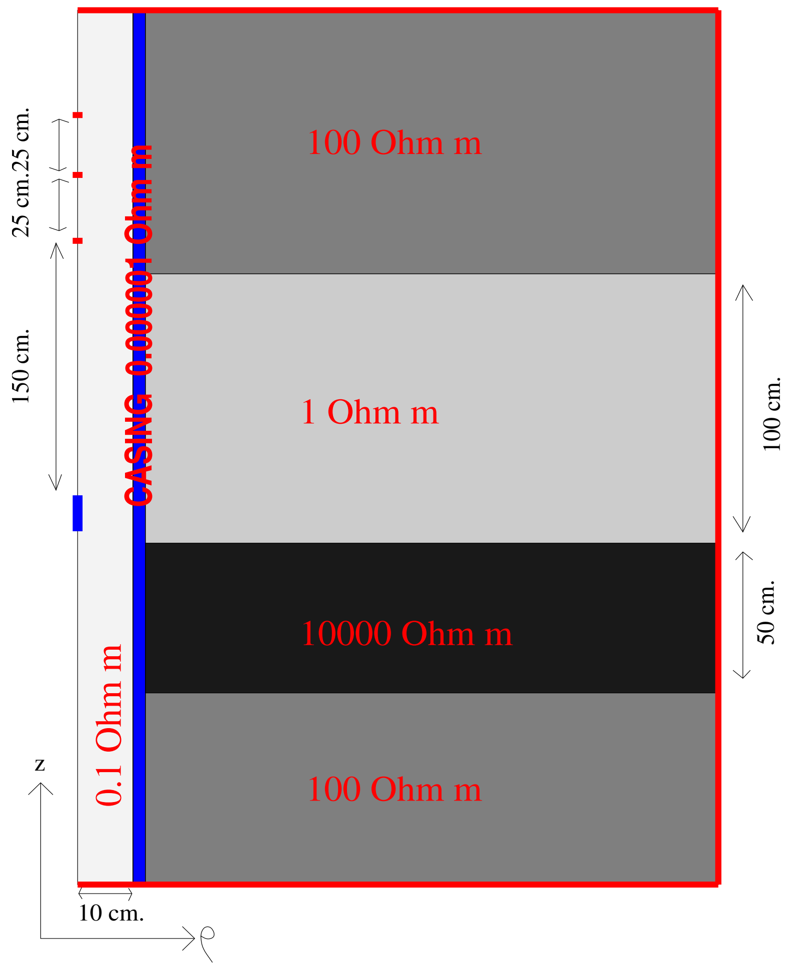
$\nabla \times \mathrm{E} = 0$ **implica** $\mathrm{E} = -\nabla\Psi$ **para algún potencial** Ψ**:**

$$\begin{cases} \nabla \times \mathrm{H} = -\sigma\nabla\Psi + \mathrm{J} \\ -\nabla \cdot \epsilon\nabla\Psi = \rho \;, \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \;. \end{cases} \quad \overset{\nabla\circ}{\Longrightarrow} \quad \begin{cases} -\nabla \cdot \sigma\nabla\Psi = \nabla \cdot \mathrm{J} \;, \\ -\nabla \cdot \epsilon\nabla\Psi = \rho \;, \\ \nabla \cdot \mu\mathrm{H} = 0 \;. \end{cases}$$

$$\boxed{-\nabla \cdot \sigma\nabla\Psi = \nabla \cdot \mathrm{J}}$$

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:



Condición de frontera de Dirichlet (Esencial) para truncar el dominio de computación.

No imponemos condiciones de frontera en el eje de simetría axial.

Término en la frontera para simular el electrodo fuente.

ECUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO

Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia:

Formulación Variacional en 3D:

$$\begin{cases} \textbf{Find } \Psi \in \Psi_D + V \textbf{ tal que :} \\ \displaystyle\int_\Omega \sigma \nabla\Psi\nabla\xi \, dV = \int_\Omega \nabla\cdot \mathrm{J}\,\xi\, dV + \int_{\Gamma_N} g\,\xi\, dS \quad \forall\xi \in V\ . \end{cases}$$

Usando Coordenadas Cilíndricas:

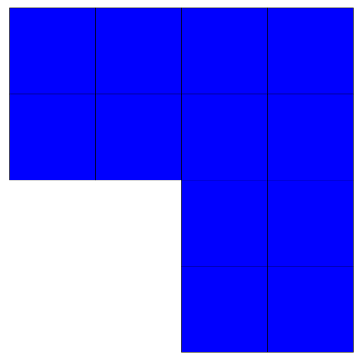
$$\begin{cases} \textbf{Find } \Psi \in \Psi_D + V \textbf{ tal que :} \\ \displaystyle\int_\Omega \sigma \nabla\Psi\nabla\xi\ \rho\ d\rho d\psi dz = \int_\Omega \nabla\cdot \mathrm{J}\,\xi\ \rho\ d\rho d\psi dz + \int_{\Gamma_N} g\,\xi\, dS \quad \forall\xi \in V\ . \end{cases}$$

Usando Notación de Elementos Finitos:

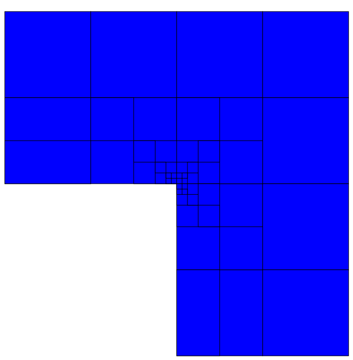
$$\begin{cases} \textbf{Find } \Psi \in \Psi_D + V \textbf{ tal que :} \\ b(\Psi,\xi) = f(\xi) \quad \forall\xi \in V\ . \end{cases}$$

ELEMENTOS FINITOS *HP*

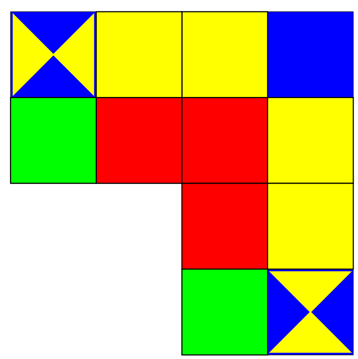
Diferentes tipos de refinamientos en elementos finitos:



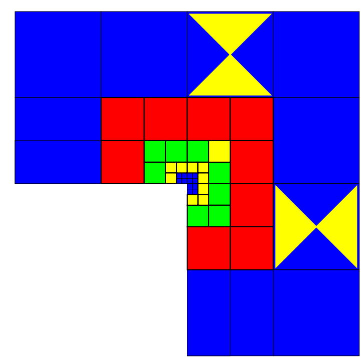
Malla inicial



Malla refinada en *h*



Malla refinada en *p*



Malla refinada en *hp*

ELEMENTOS FINITOS *HP*

CONVERGENCIA EXPONENCIAL CONVERGENCIA EXPONENCIAL CONVERGENCIA EXPONENCIAL
en problemas CON y sin singularidades

si el mallado es óptimo en hp

El error de dispersión es más pequeño

a medida que p incrementa.

Es posible reproducir más detalles geométricos

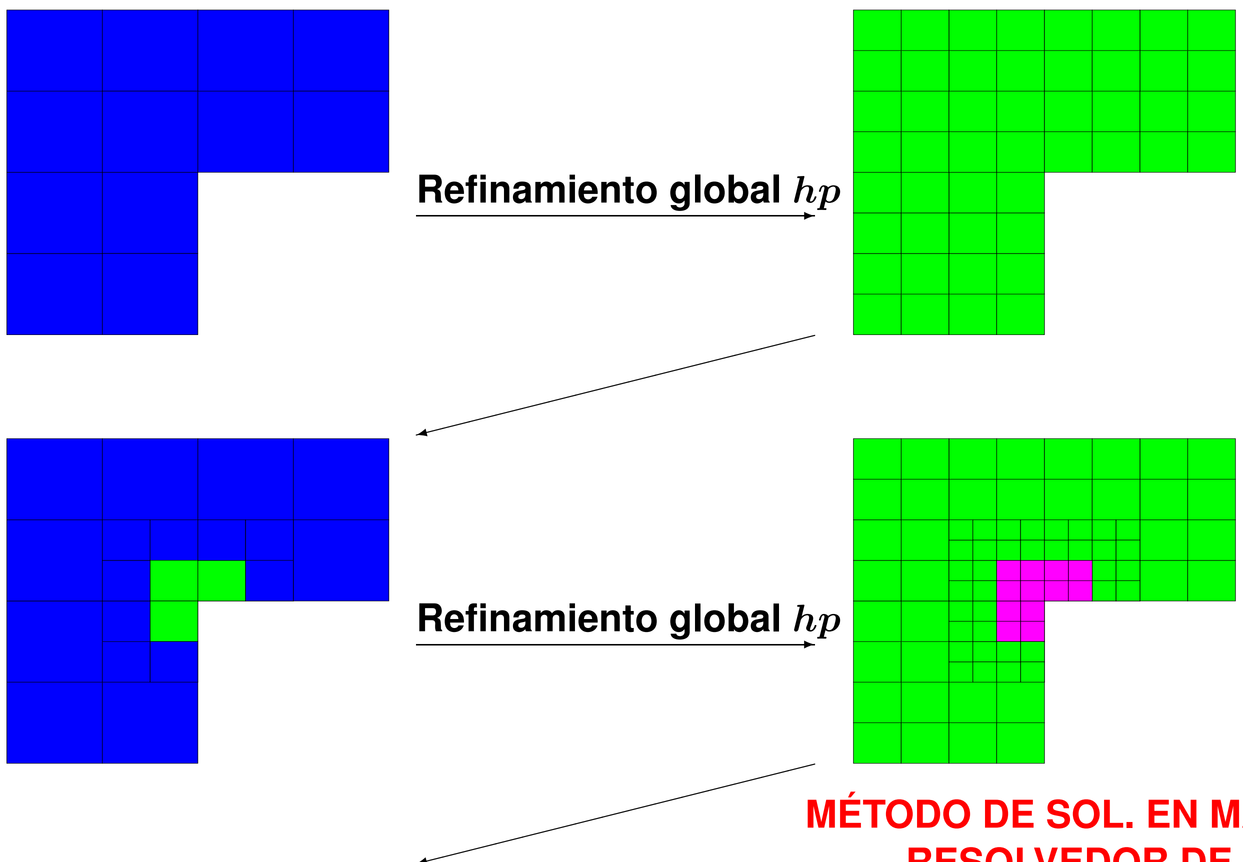
a medida que el tamaño h de cada elemento disminuye.

REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Refinamientos automáticos en hp

Mallas gruesas
(hp)

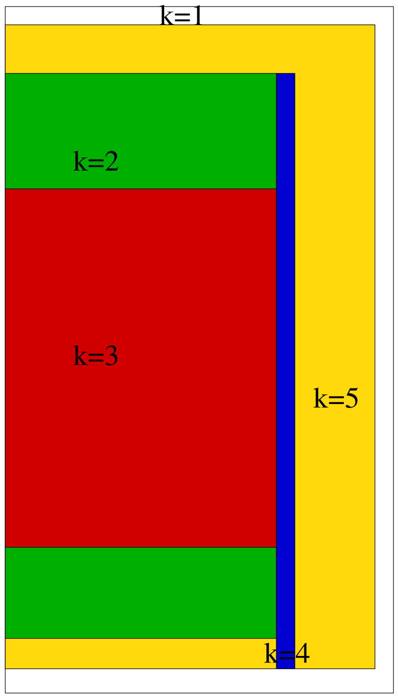
Mallas finas
$(h/2, p+1)$



MÉTODO DE SOL. EN MALLAS FINAS:
RESOLVEDOR DE DOS MALLAS

REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Ecuación del calor NO isotrópica (Laboratorios de Sandia, EEUU).

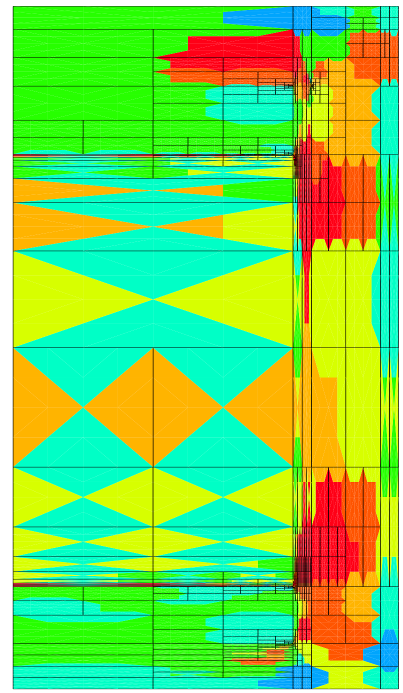


Ecuación: $\nabla(\mathrm{K}\nabla u) = f^{(k)}$

$$\mathrm{K} = \mathrm{K}^{(k)} = \begin{bmatrix} K_x^{(k)} & 0 \\ 0 & K_y^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$K_x^{(k)} = (25,\ 7,\ 5,\ 0.2,\ 0.05)$$

$$K_y^{(k)} = (25,\ 0.8,\ 0.0001,\ 0.2,\ 0.05)$$

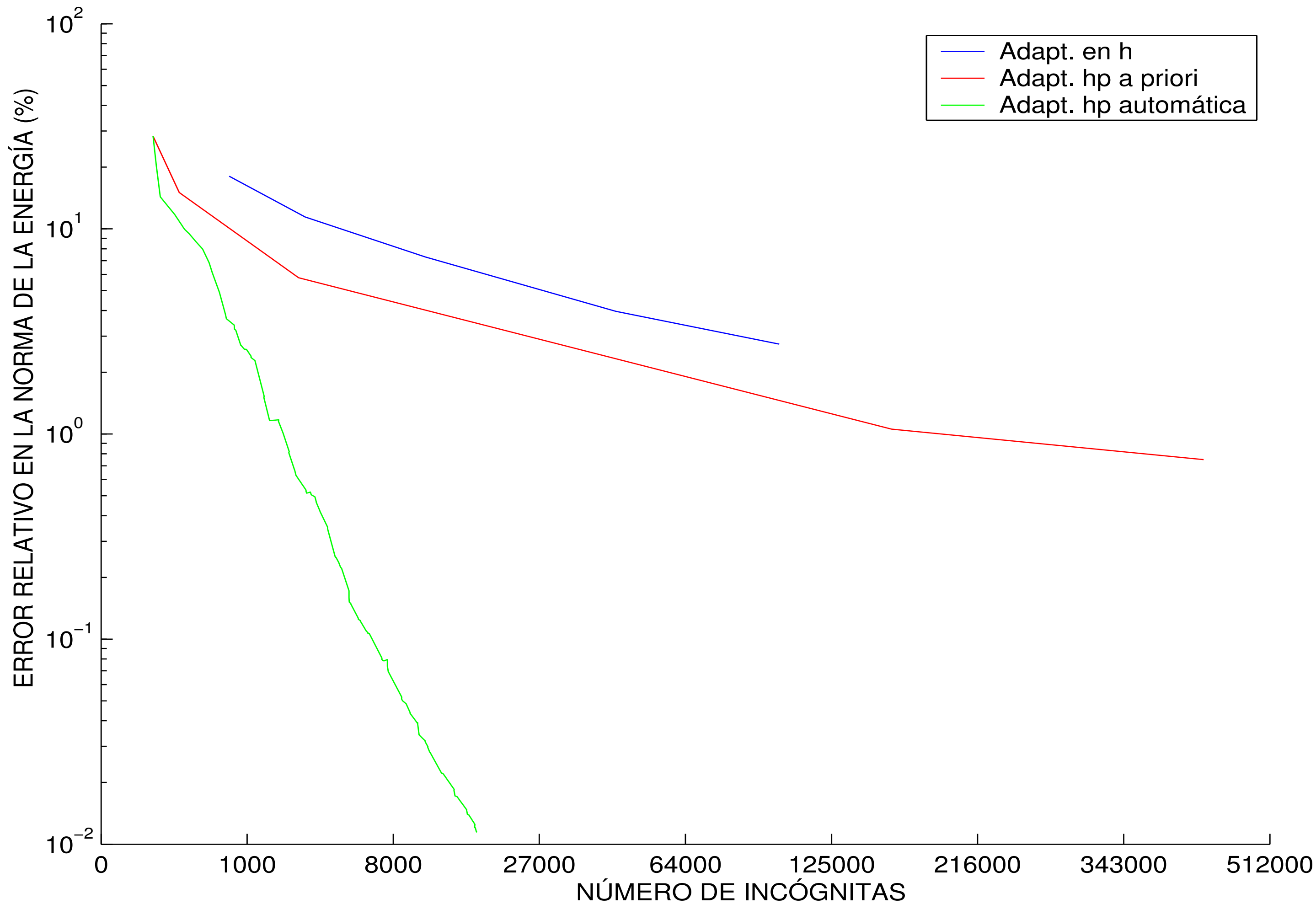


Mallado hp óptimo

REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Convergencia usando distintos tipos de refinamientos

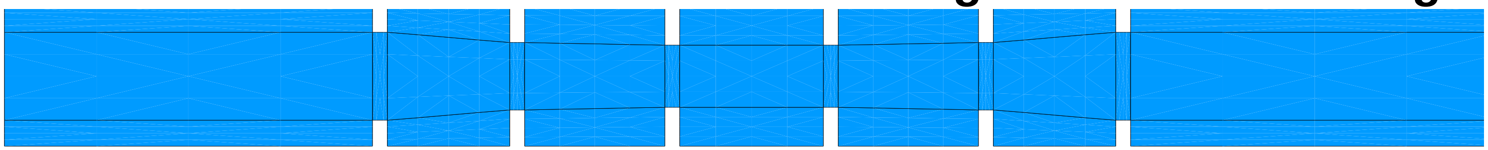
Ecuación del calor NO isotrópica

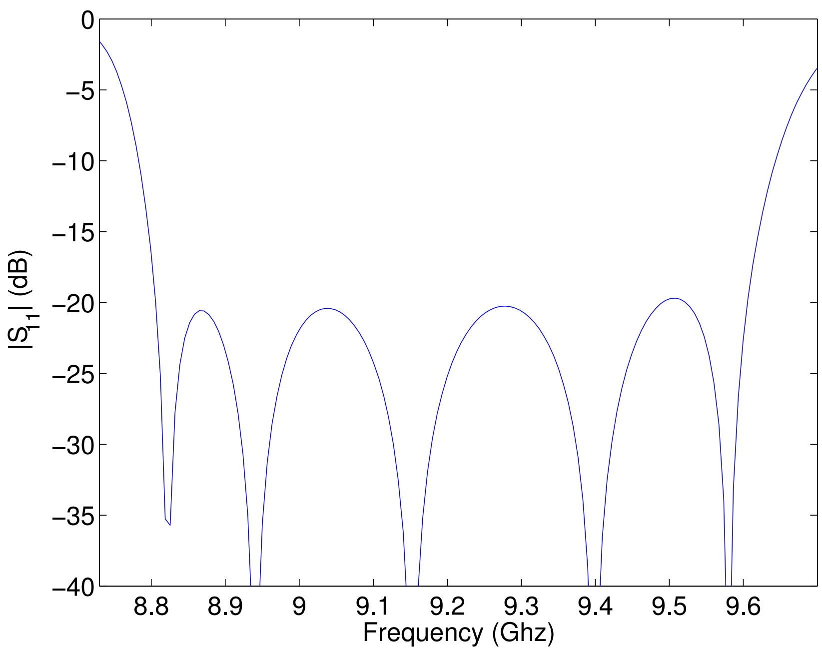


REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Guía de ondas con seis írises

Geometría de un corte transversal de la guía de ondas rectangular





Cantidad de energía reflejada

Seis írises resonantes en el plano H.

Modo dominante (fuente): TE_{10}.

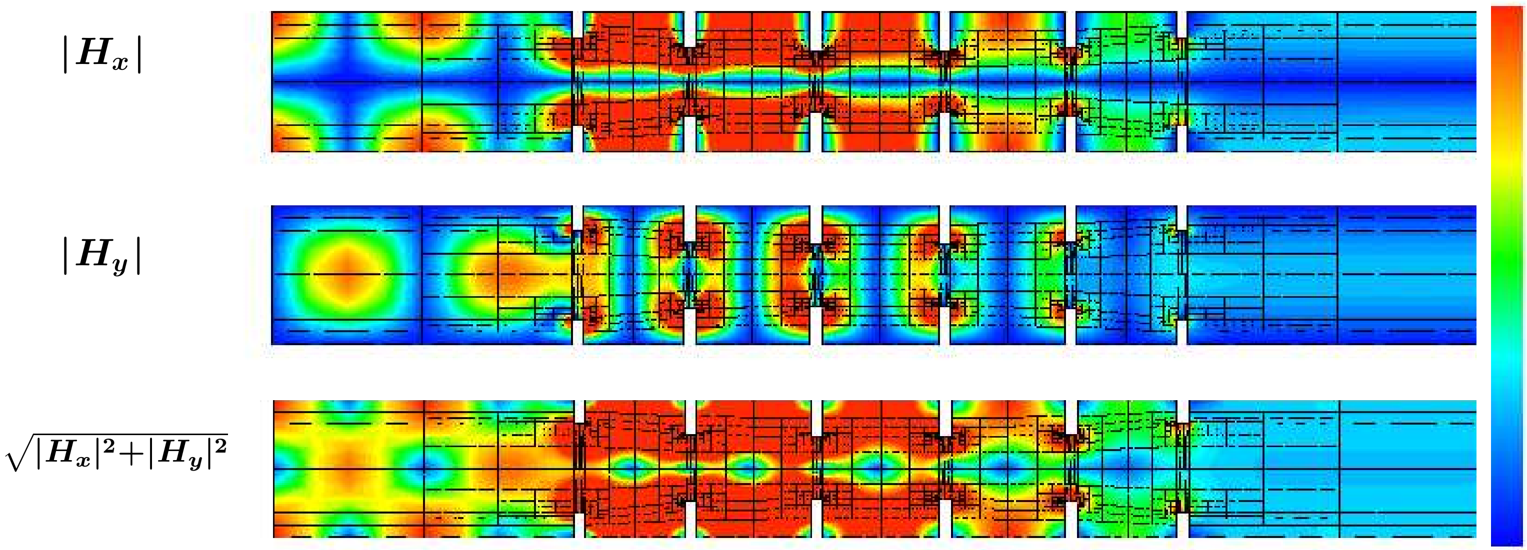
Dimensiones $\approx 20 \times 2 \times 1$ **cm.**

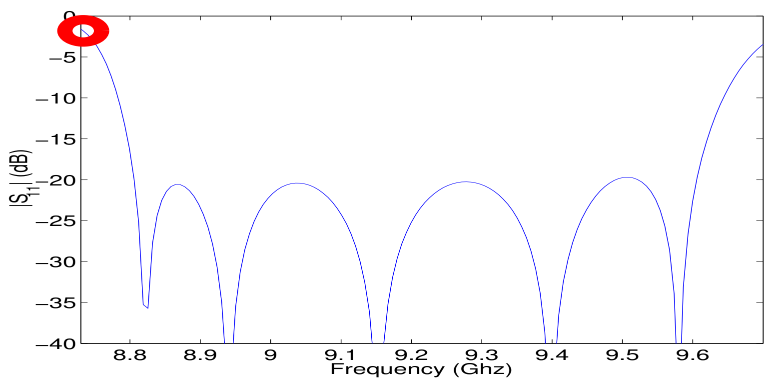
Frecuencias de interés: $\approx 8.8 - 9.6$ **Ghz**

Frecuencia de corte: ≈ 6.56 **Ghz**

REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Solución de Elementos Finitos con frecuencia $= 8.72$ Ghz





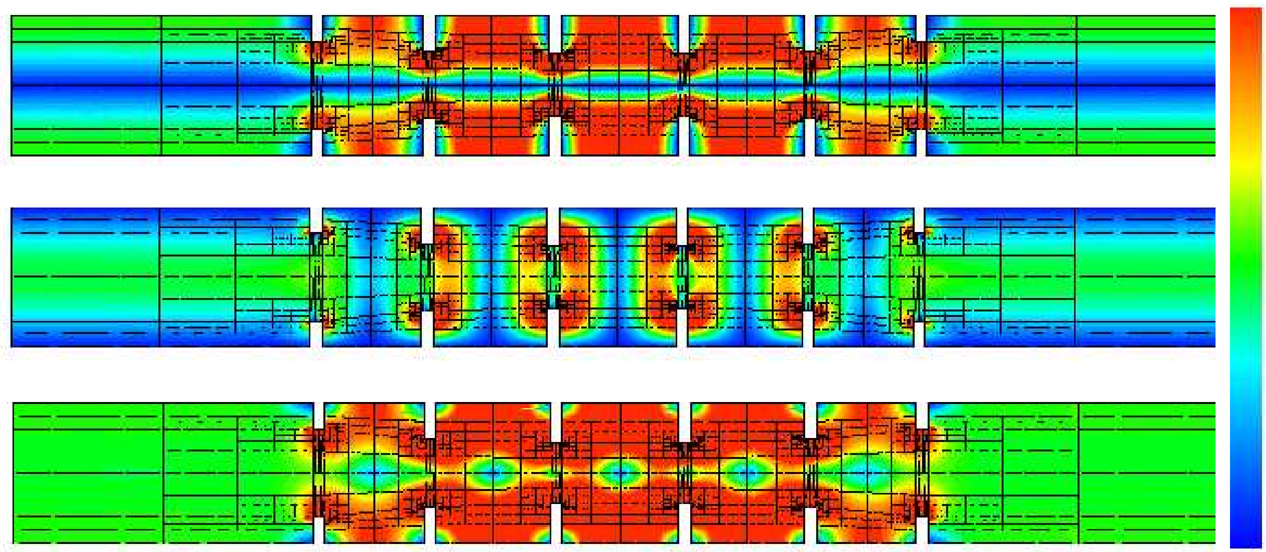
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

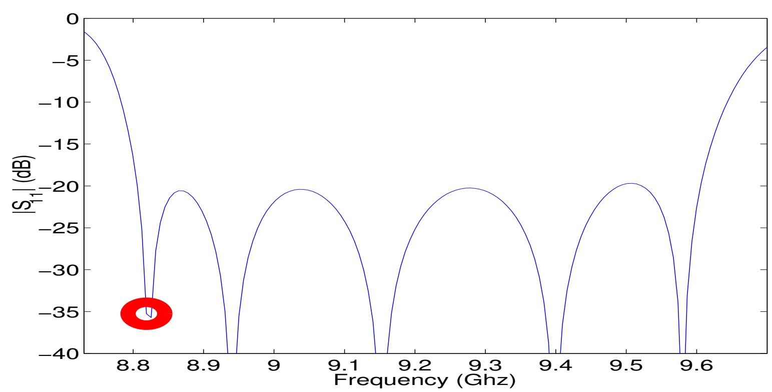
Solución de Elementos Finitos con frecuencia $= 8.82$ Ghz

$|H_x|$

$|H_y|$

$\sqrt{|H_x|^2+|H_y|^2}$





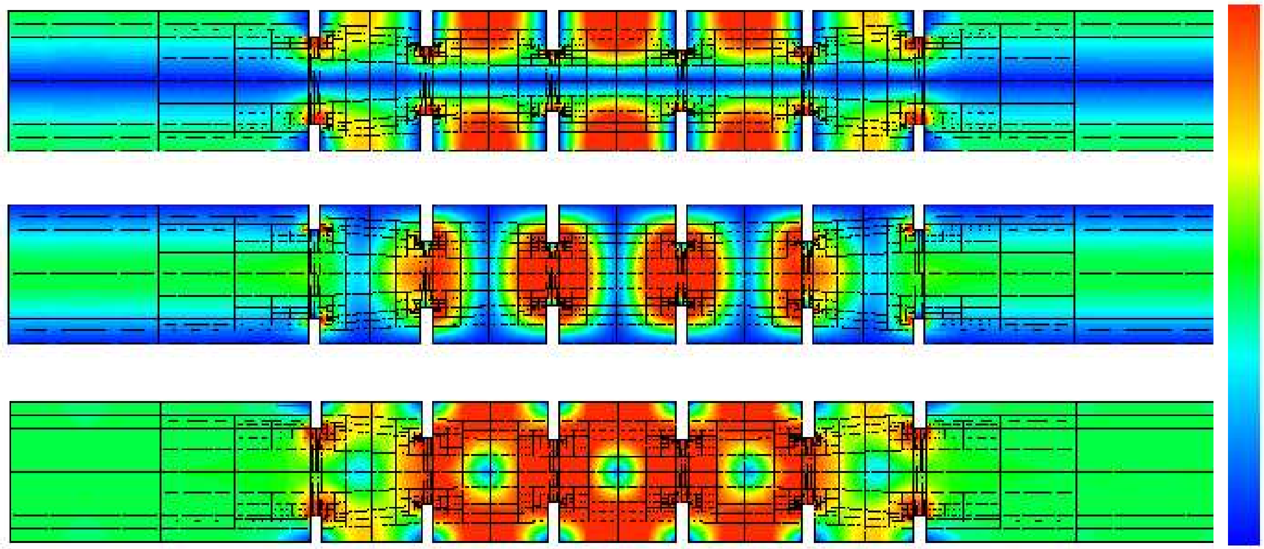
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

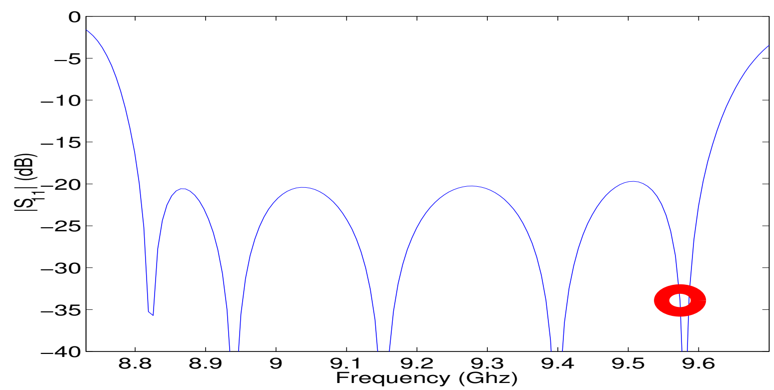
Solución de Elementos Finitos con frecuencia $= 9.58$ Ghz

$|H_x|$

$|H_y|$

$\sqrt{|H_x|^2+|H_y|^2}$





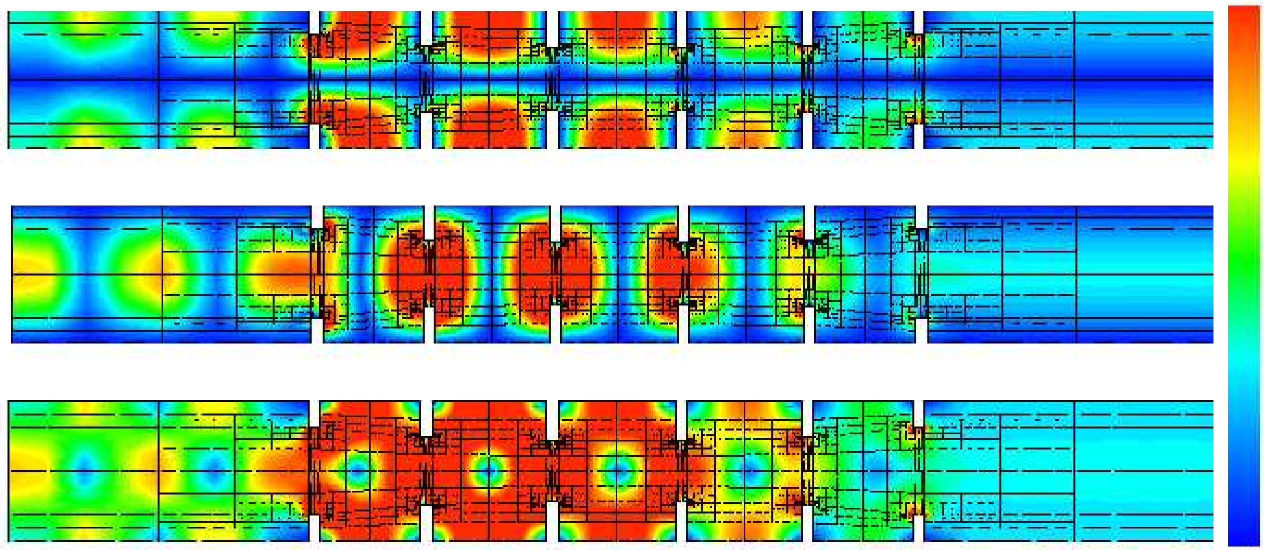
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

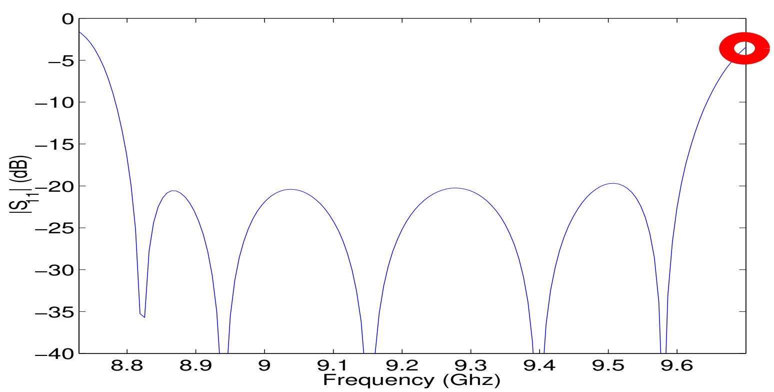
Solución de Elementos Finitos con frecuencia $= 9.71$ Ghz

$|H_x|$

$|H_y|$

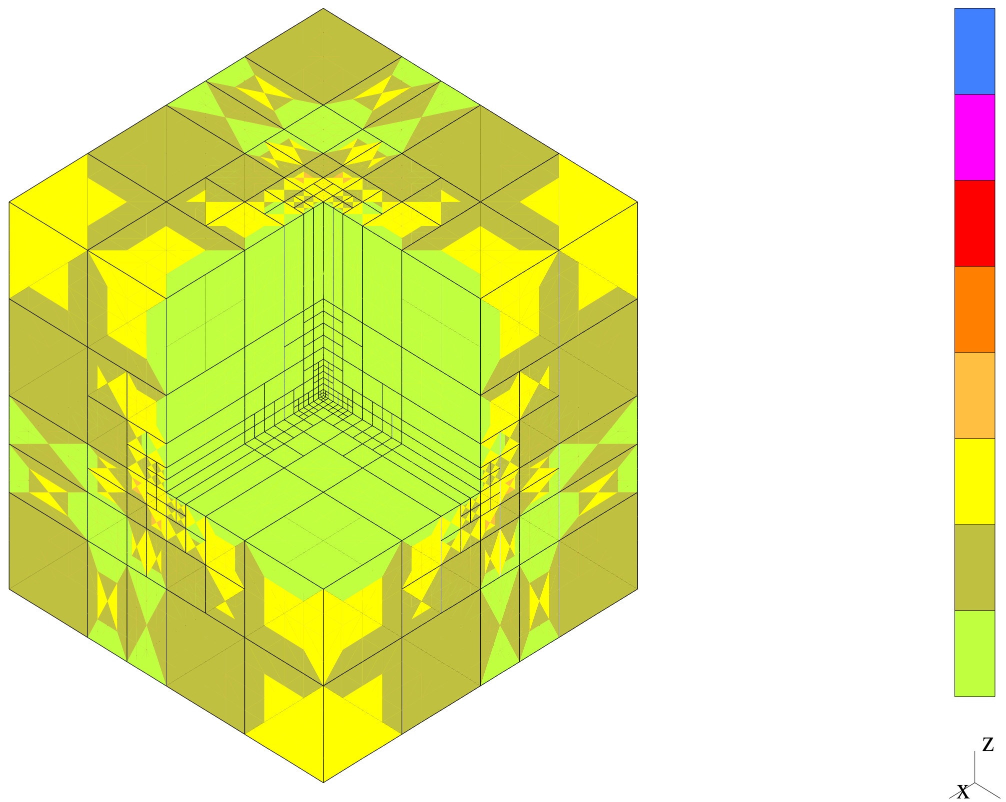
$\sqrt{|H_x|^2+|H_y|^2}$





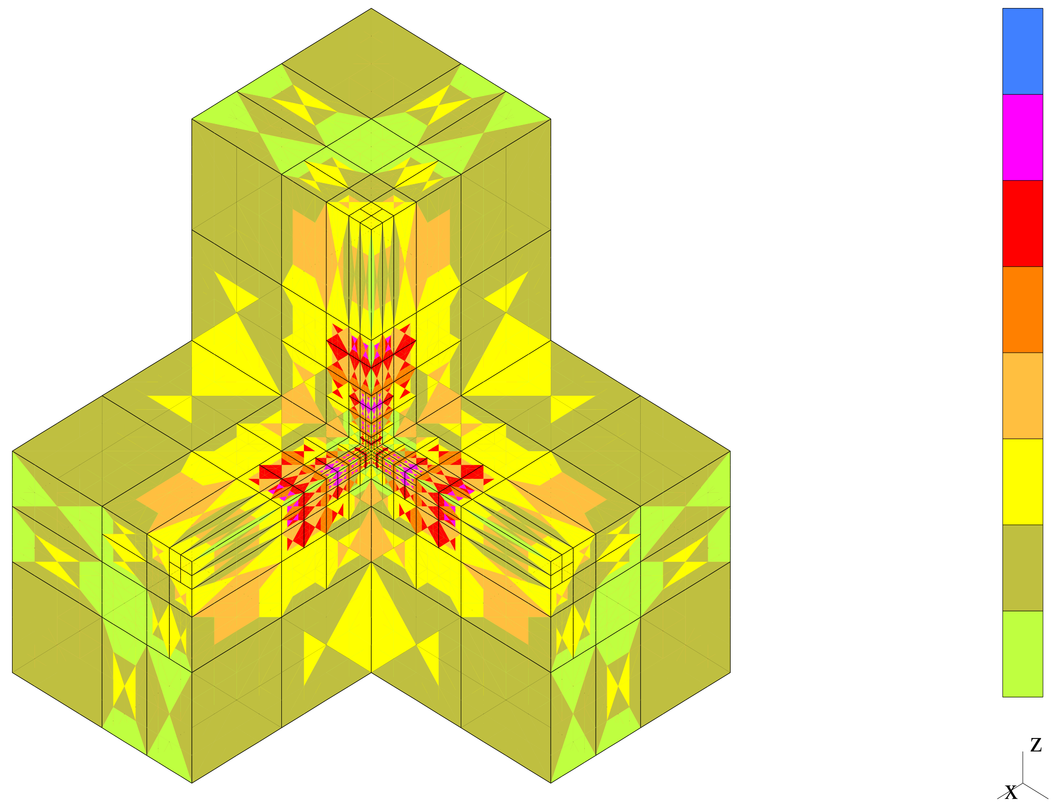
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Problema de Fichera. Mallado hp.



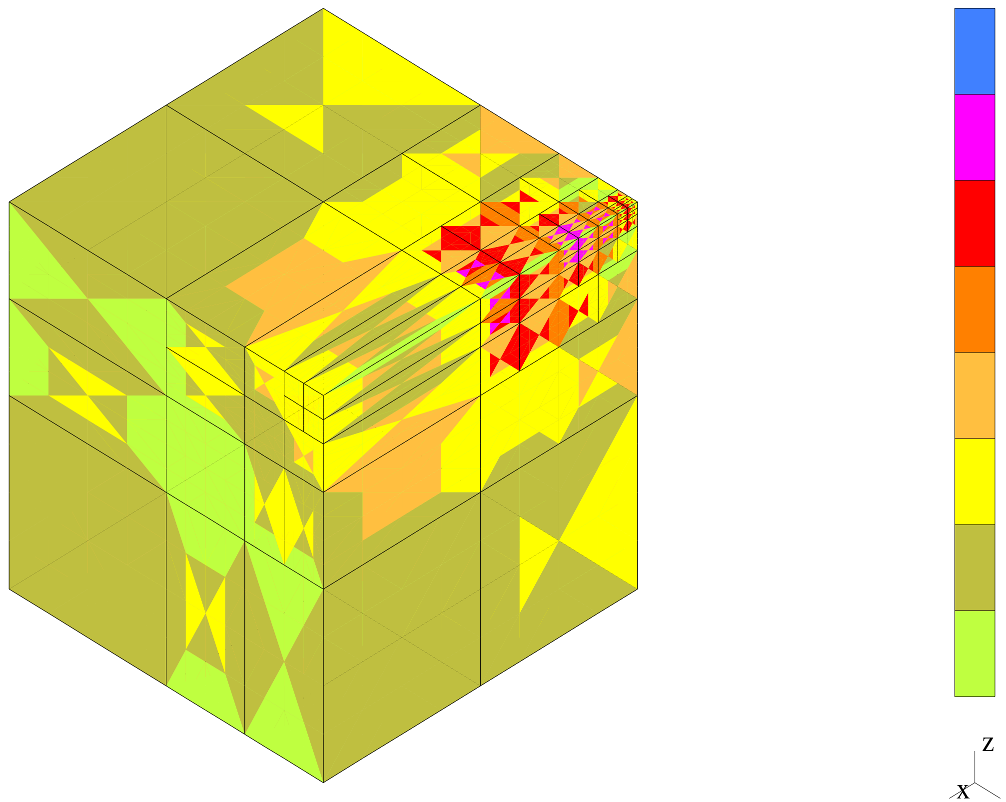
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Problema de Fichera. Mallado hp.



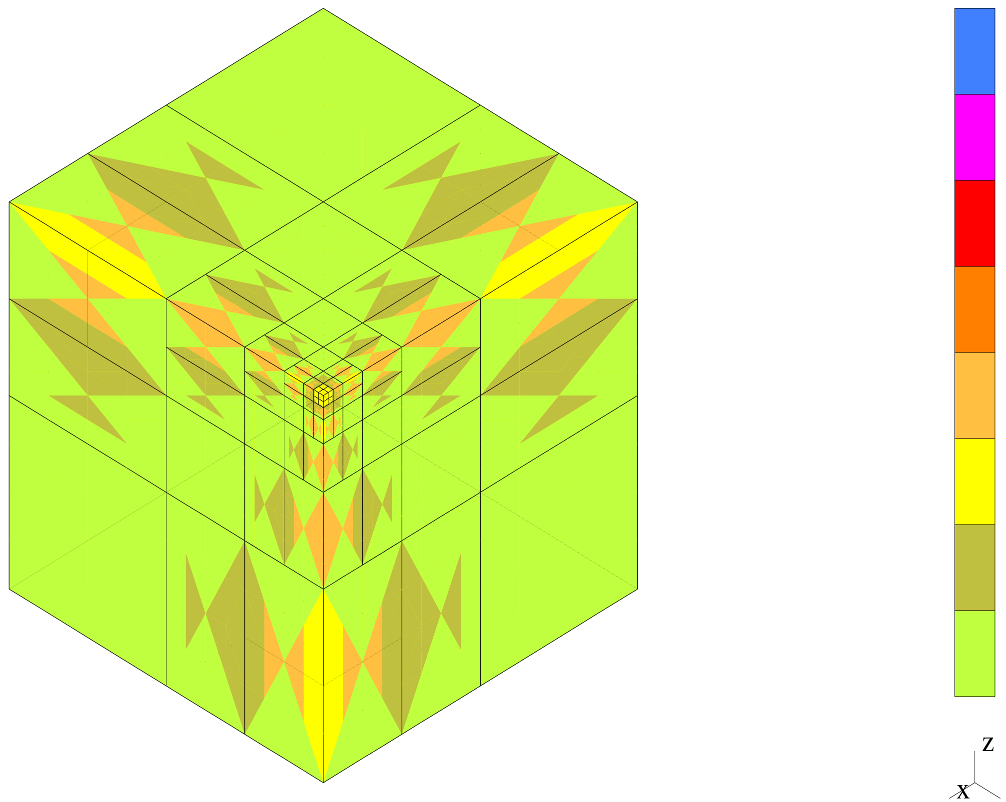
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Problema de Fichera. Mallado hp.



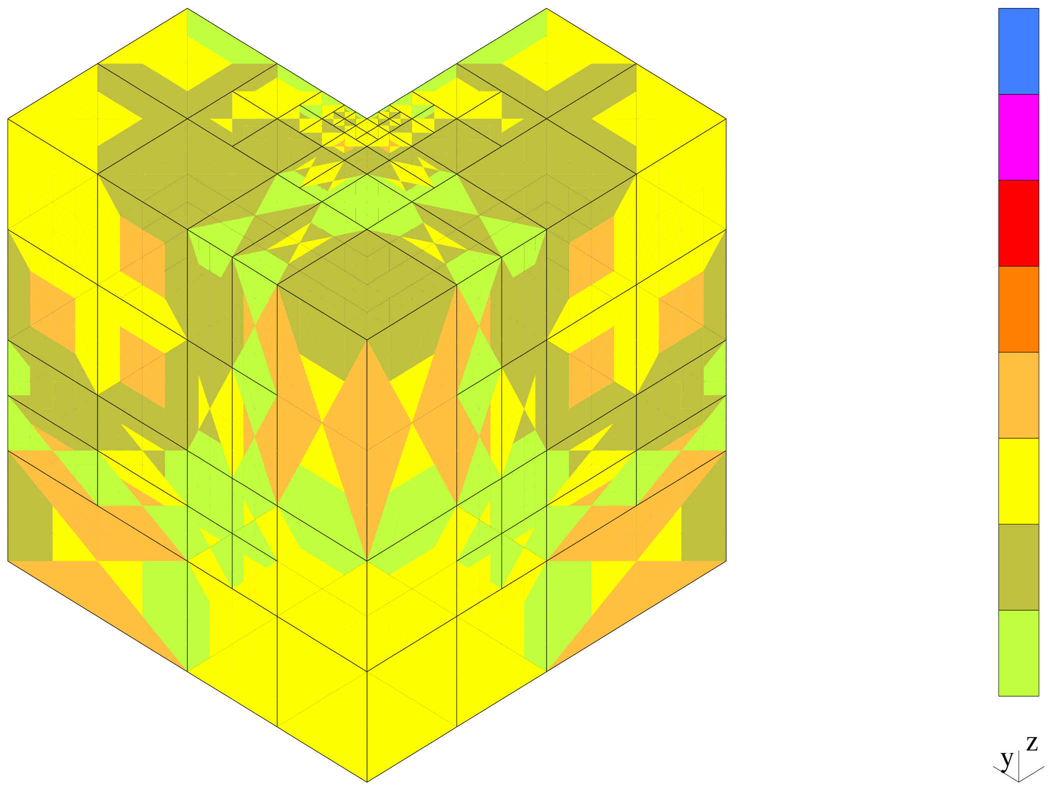
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Problema de Fichera. Mallado hp.



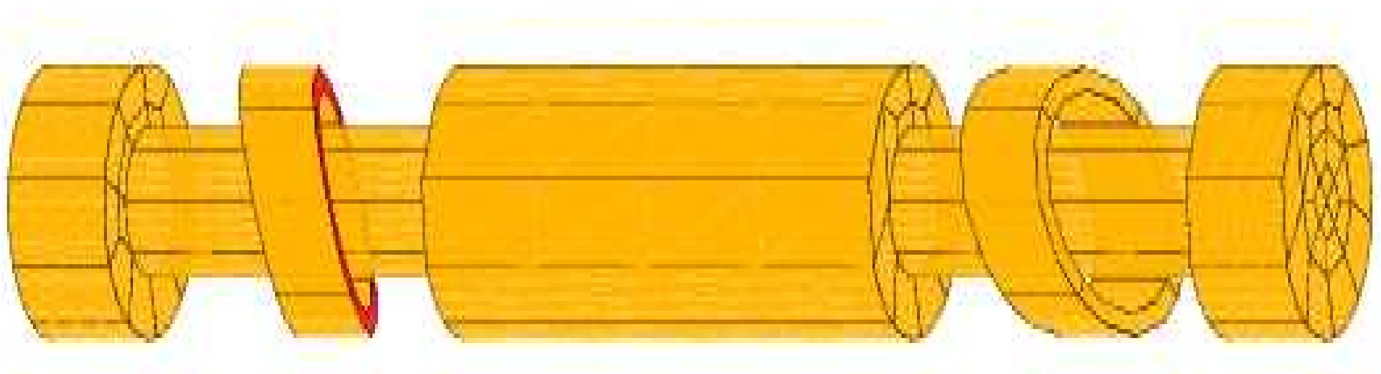
REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Problema de Fichera. Mallado hp.



REFINAMIENTOS AUTOMÁTICOS ÓPTIMOS EN HP

Aplicaciones a la Ingeniería Petrolífera:



Los resultados no son buenos. Por qué ?

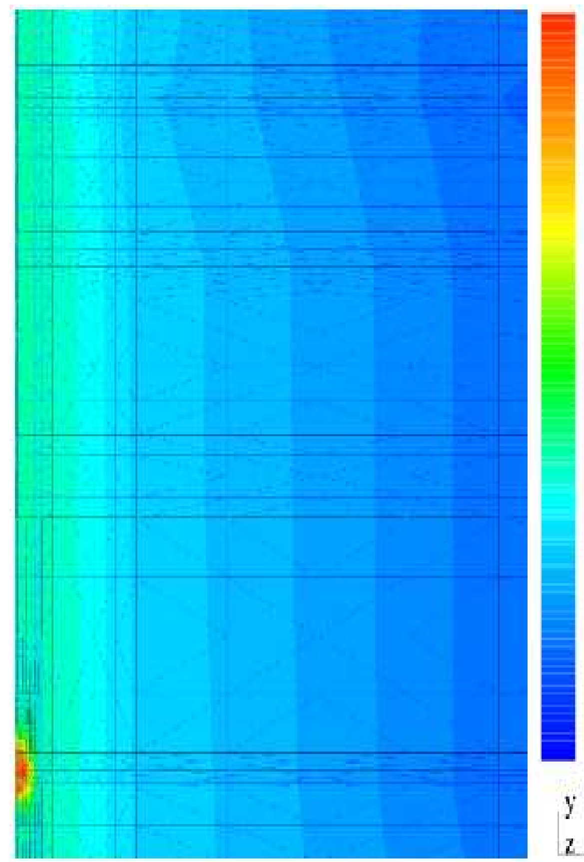
No nos interesa la norma de la energía, sino la solución (o segunda diferencia de potencial, etc.) en los electrodos receptores.

REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Qué significa adaptatividad 'orientada a un objetivo' ?

Consideramos el siguiente problema:

$$\begin{cases} \textbf{Encontrar } \Psi \in V \textbf{ tal que :} \\ b(\Psi, \xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ . \end{cases}$$



REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Qué significa adaptatividad ’orientada a un objetivo’ ?

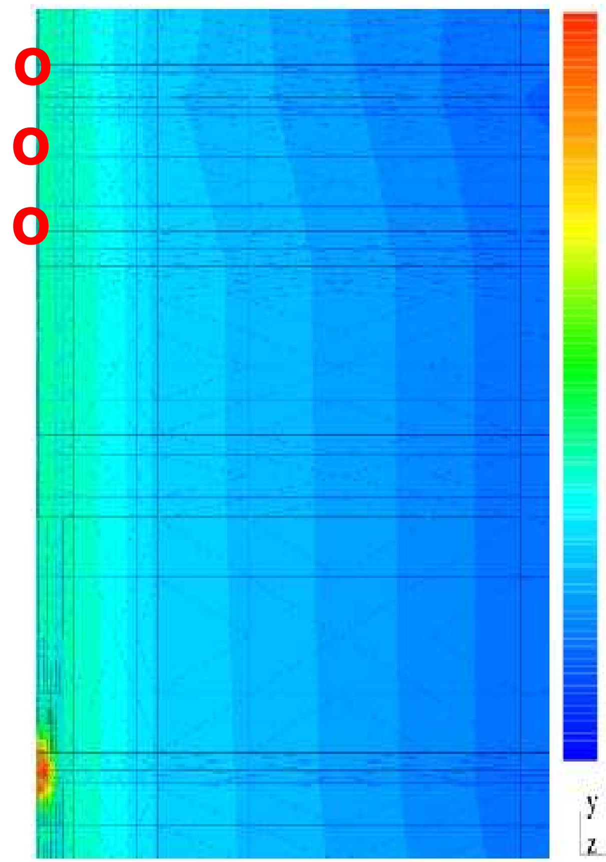
Consideramos el siguiente problema:

$$\begin{cases} \text{Encontrar } \Psi \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi,\xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ . \end{cases} \qquad \textcolor{red}{NO \ !!!!!}$$

El problema que *realmente* queremos resolver es:

$$\begin{cases} \text{Encontrar } \textcolor{red}{L(\Psi)}, \text{ donde } \Psi \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi,\xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ , \end{cases}$$

donde nuestro objetivo es calcular $L(\Psi)$.



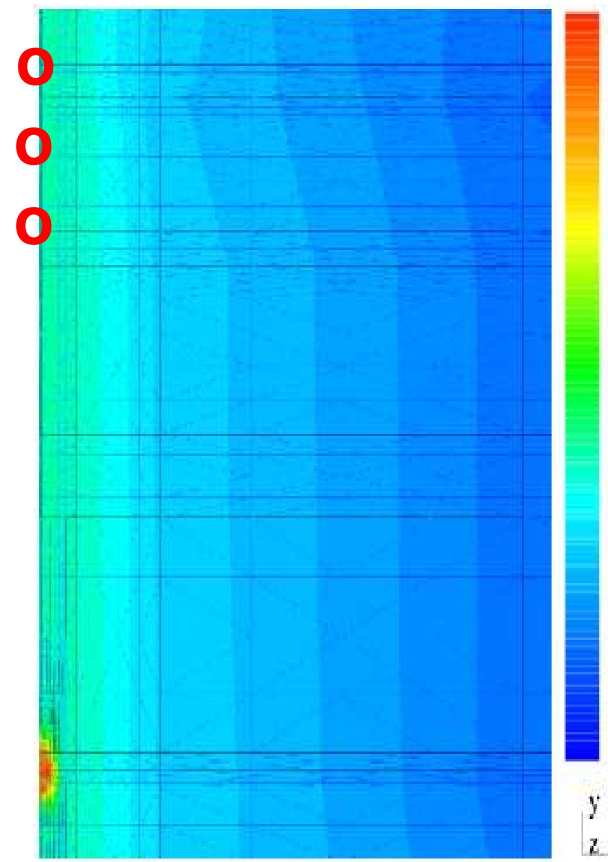
REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Qué significa adaptatividad 'orientada a un objetivo' ?

Consideramos el siguiente problema:

$$\begin{cases} \text{Encontrar } \Psi \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi, \xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ . \end{cases}$$

NO !!!!!



El problema que *realmente* queremos resolver es:

$$\begin{cases} \text{Encontrar } L(\Psi)\text{, donde } \Psi \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi, \xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ , \end{cases}$$

donde nuestro objetivo es calcular $L(\Psi)$.

Adaptatividad en HP 'orientada a un objetivo consiste en construir un mallado óptimo:

$$\arg \min_{hp:|L(e_{hp})| \leq TOL} N_{hp}$$

REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Formulación Matemática (Adaptatividad 'Orientada a un Objetivo')

Consideramos el siguiente problema (formulación variacional):

$$\begin{cases} \text{Encontrar } L(\Psi)\text{, donde } \Psi \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi, \xi) = f(\xi) \quad \forall \xi \in V \ . \end{cases}$$

Definimos el residual $r_{hp}(\xi) = b(e_{hp}, \xi)$. Buscamos una función G solución del siguiente problema:

$$\begin{cases} \text{Encontrar } G \in V \text{ tal que :} \\ r(G) = L(e_{hp}) \ . \end{cases}$$

G es la solución del *problema dual*:

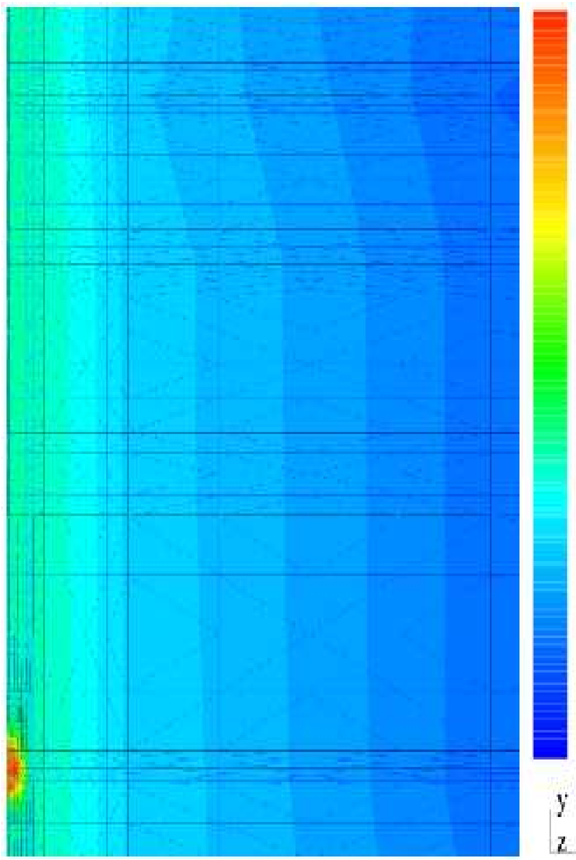
$$\begin{cases} \text{Encontrar } G \in V \text{ tal que :} \\ b(\Psi, G) = L(\Psi) \quad \forall \Psi \in V \ . \end{cases}$$

En particular, $L(e) = b(e, G)$.

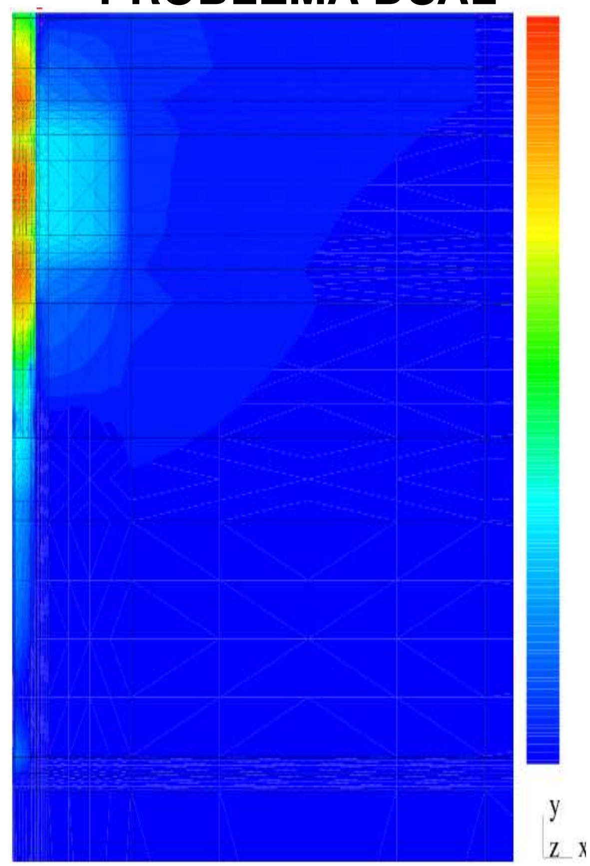
REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Formulación Matemática (Adaptatividad 'Orientada a un Objetivo')

PROBLEMA DIRECTO



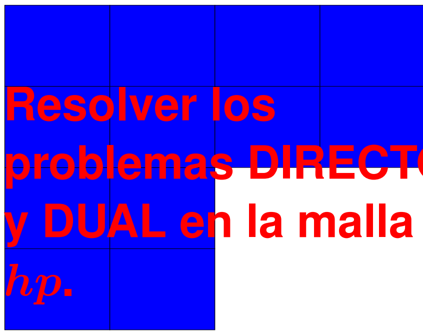
PROBLEMA DUAL



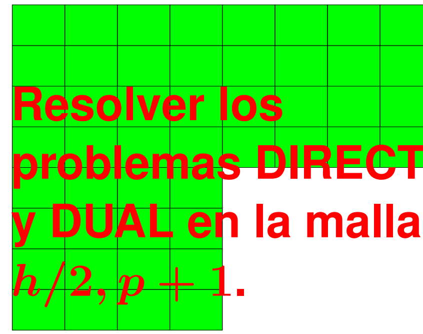
$$L(\Psi)=b(\Psi,G)$$

REFINAMIENTOS ORIENTADOS A UN OBJETIVO

Algoritmo de auto-adaptatividad 'orientada a un objetivo' en HP



$\longrightarrow$

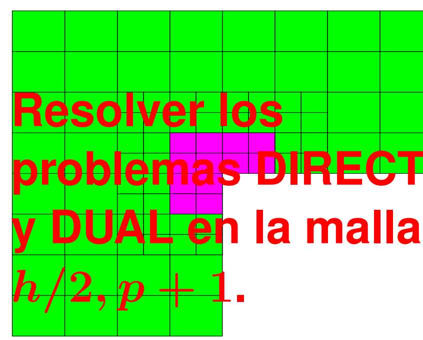


Calcular $e = e_{h/2,p+1} - e_{hp}$, **y** $\epsilon = G_{h/2,p+1} - G_{hp}$.

Representar el error $|L(e)| = |b(e,\epsilon)| \leq \sum_K |b_K(e,\epsilon)|$.

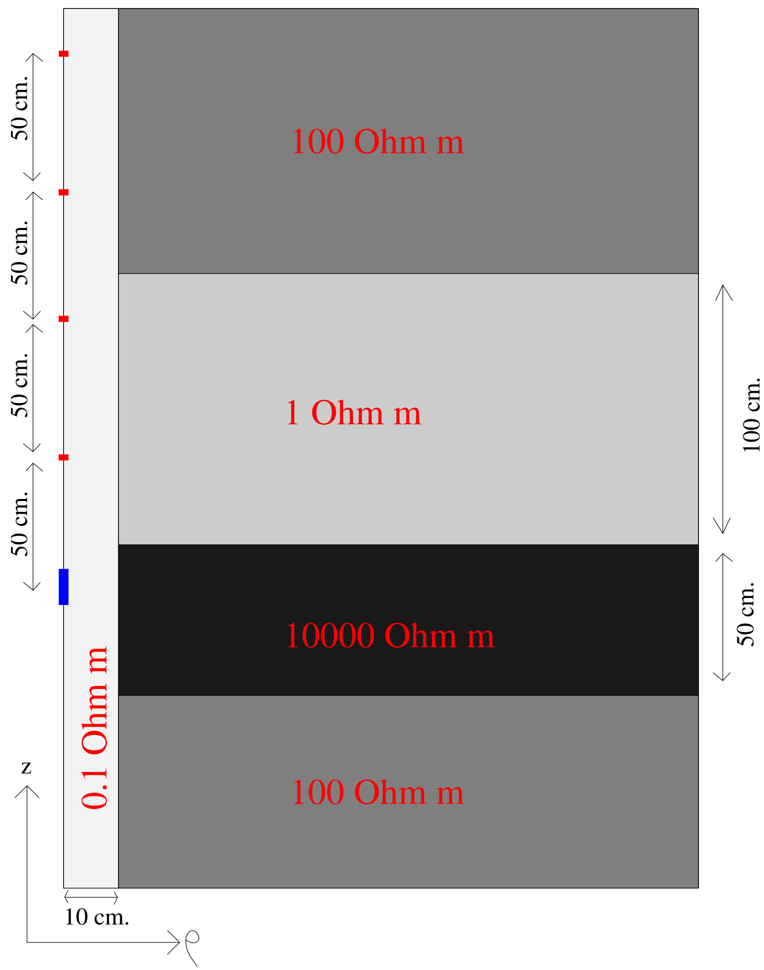
Usar la auto-adaptatividad hp **basada en la norma de la energía.**

$\longrightarrow$



RESULTADOS NUMÉRICOS

Simulación de una Herramienta Electromagnética (Baker-Atlas)



Problema con simetría axial.

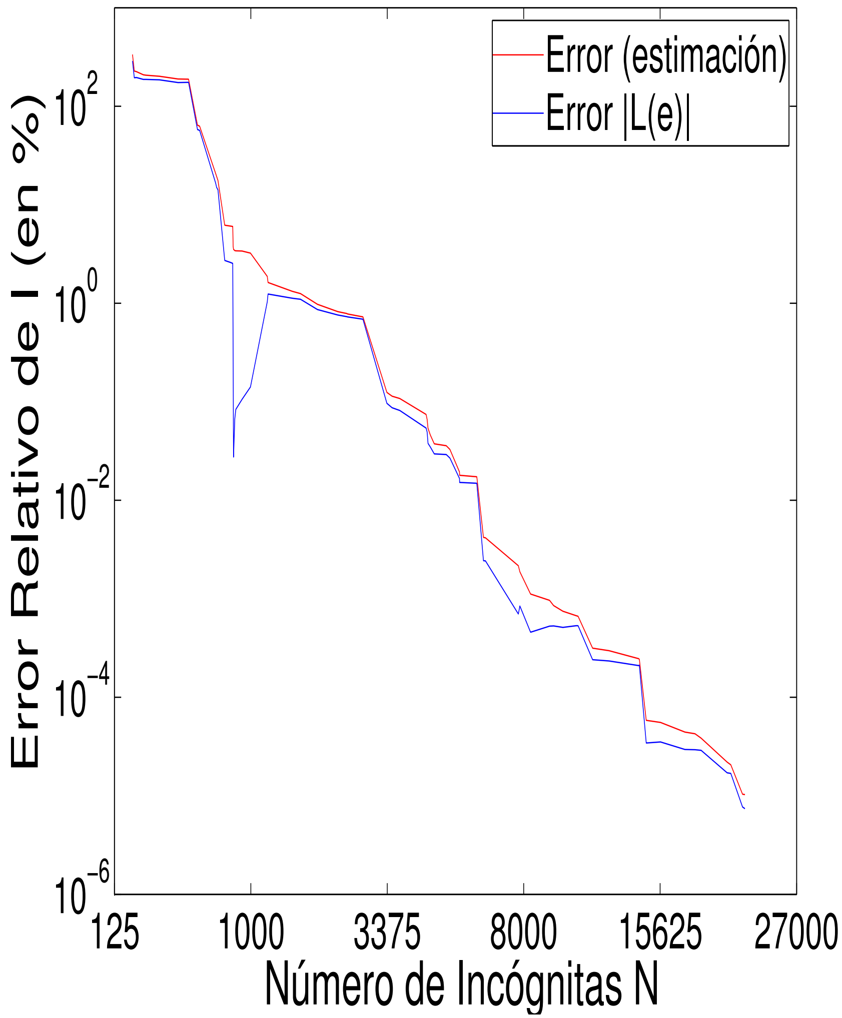
Cuatro materiales diferentes.

Resistividad de los materiales varía en CINCO órdenes de magnitud.

Objetivo: Determinar corriente eléctrica en los electrodos receptores.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Convergencia Exponencial



Herramienta electromagnética en un subsuelo formado por cuatro materiales.

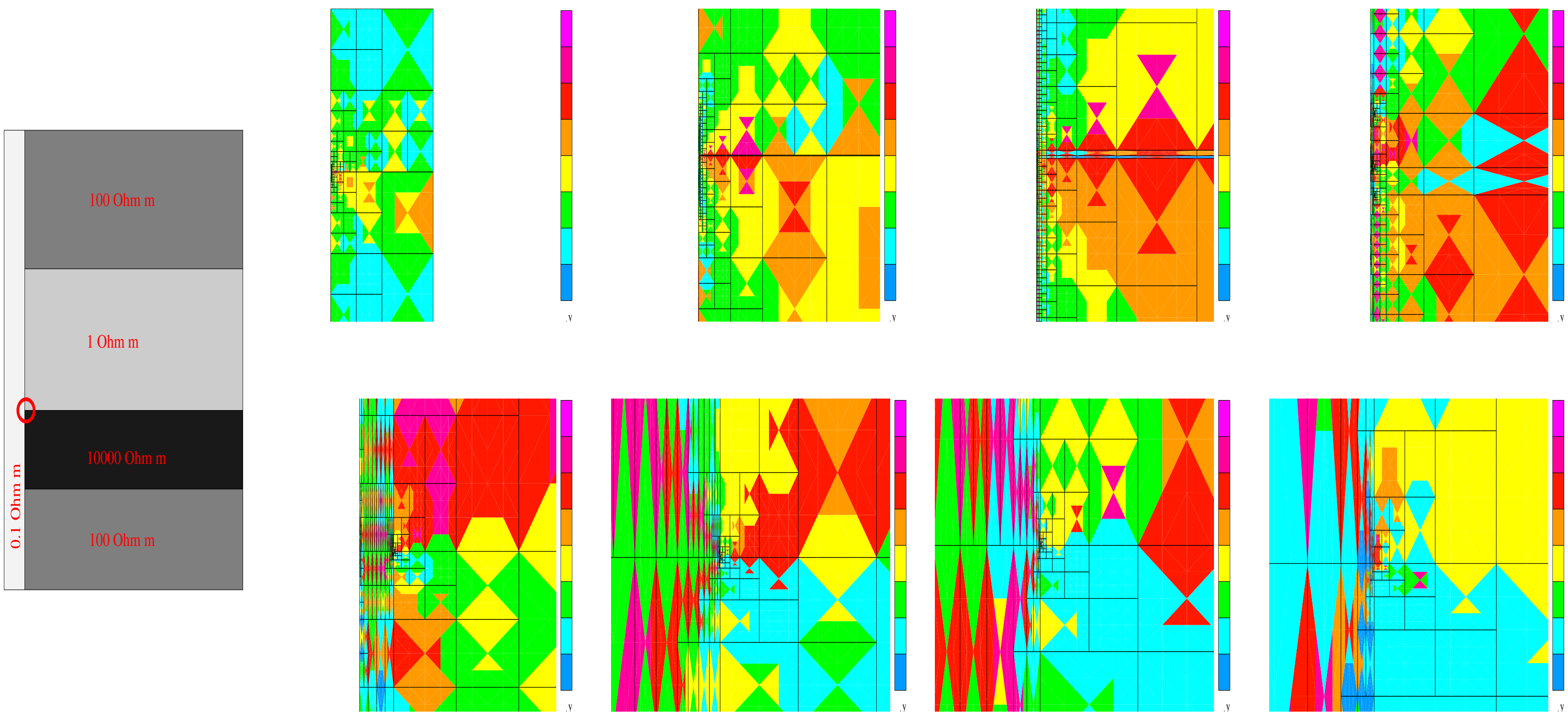
Distancia entre el electrodo fuente y receptor: $150cm$.

$|L(e)| \leq \sum_K |b(e,\epsilon)| =$ **Estimación del Error.**

Error relativo (en $\%$) vs Error en dB
10^{-6} **% =**10^{-7} **dB**
10^{-4} **% =**10^{-5} **dB**
10^{-2} **% =**10^{-3} **dB**
10^{0} **% =** 10^{-1} **dB**
10^{2} **% =** 10^{-1} **dB**

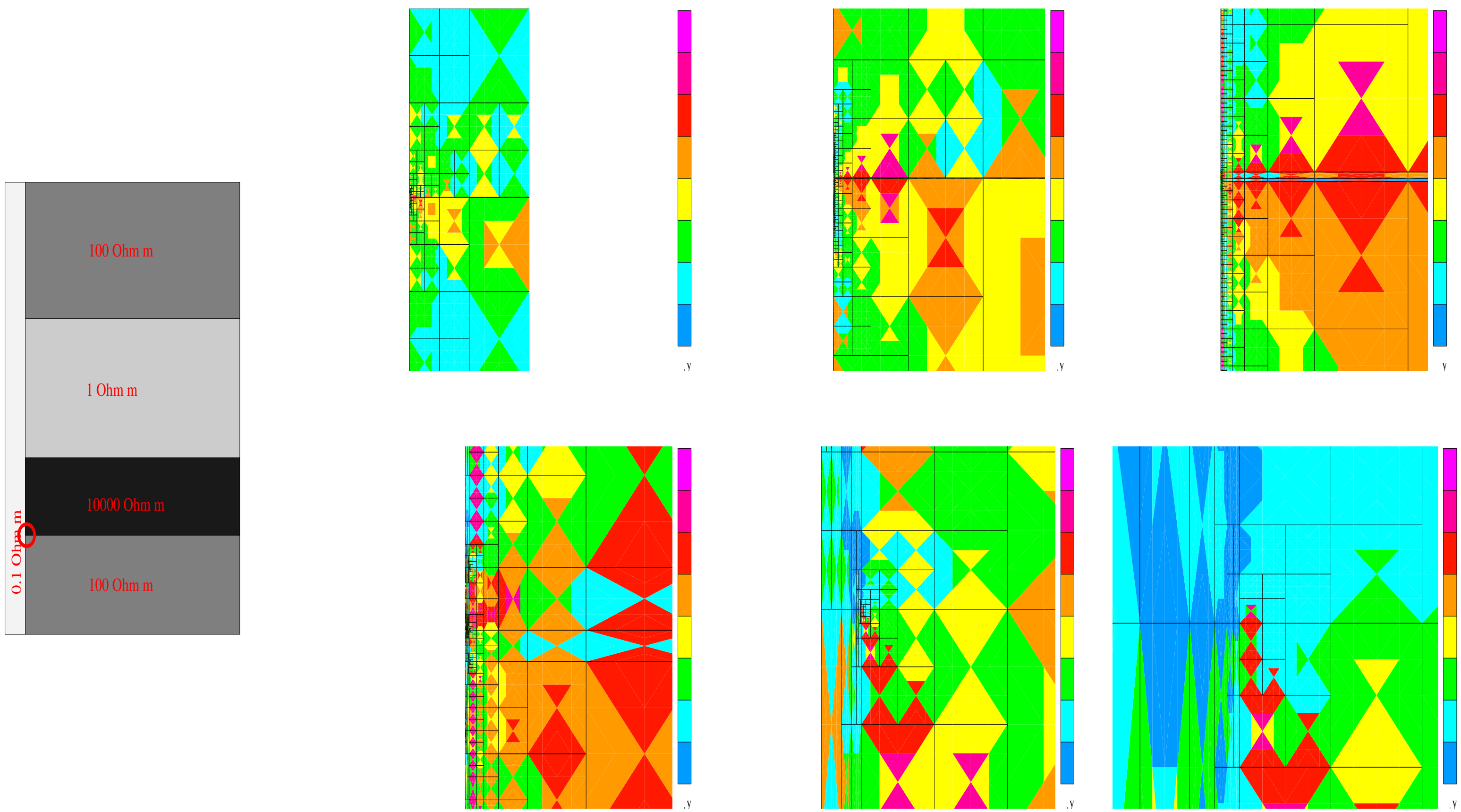
RESULTADOS NUMÉRICOS

Malla final en hp (ampliaciones por un órden de magnitud)



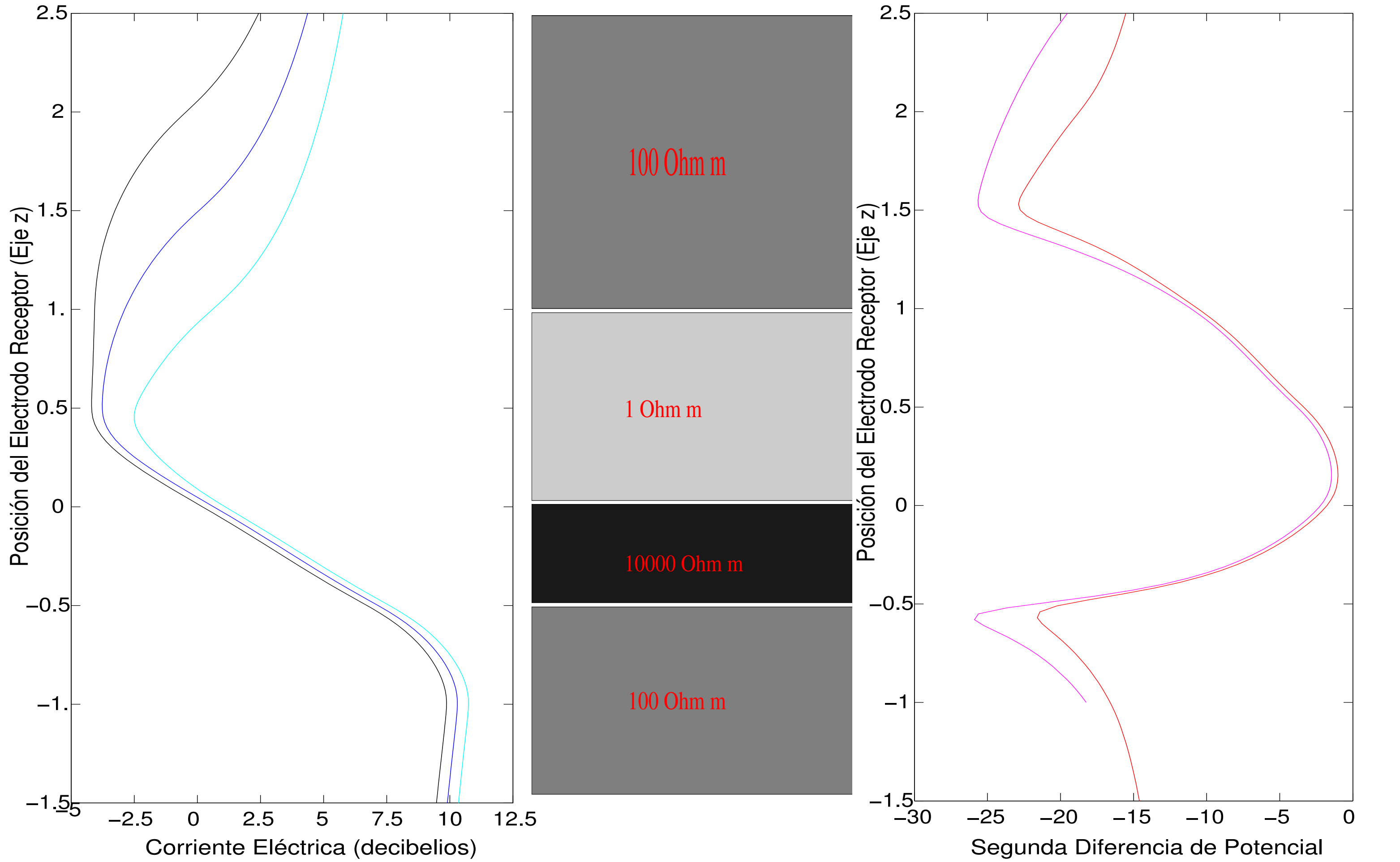
RESULTADOS NUMÉRICOS

Malla final en hp (ampliaciones por un órden de magnitud)



RESULTADOS NUMÉRICOS

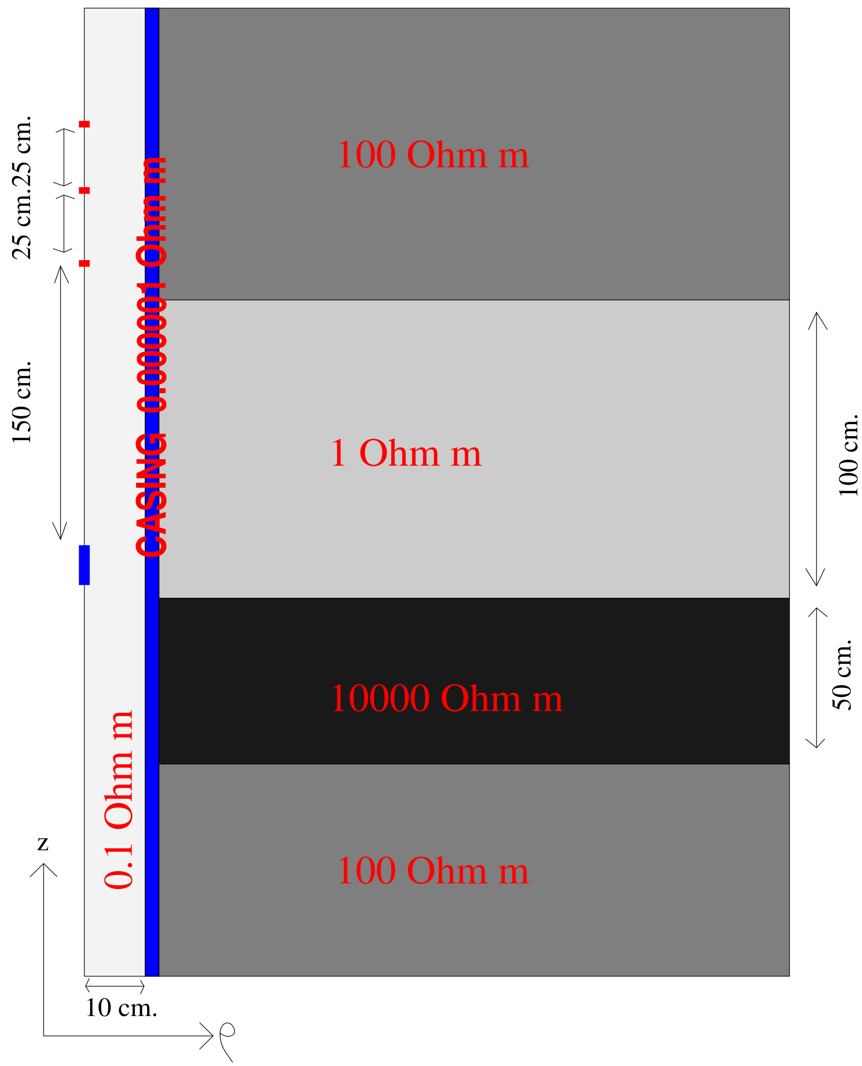
Resultados Obtenidos por el MEF



Distancia entre el electrodo emisor y los electrodos receptores:

0.5 m -azul claro- ; 1.0 m -azul oscuro- ; 1.5 m -negro- 0.5 m -rojo- ; 1.0 m -magenta-

RESULTADOS NUMÉRICOS



Problema con simetría axial.

Cinco materiales diferentes.

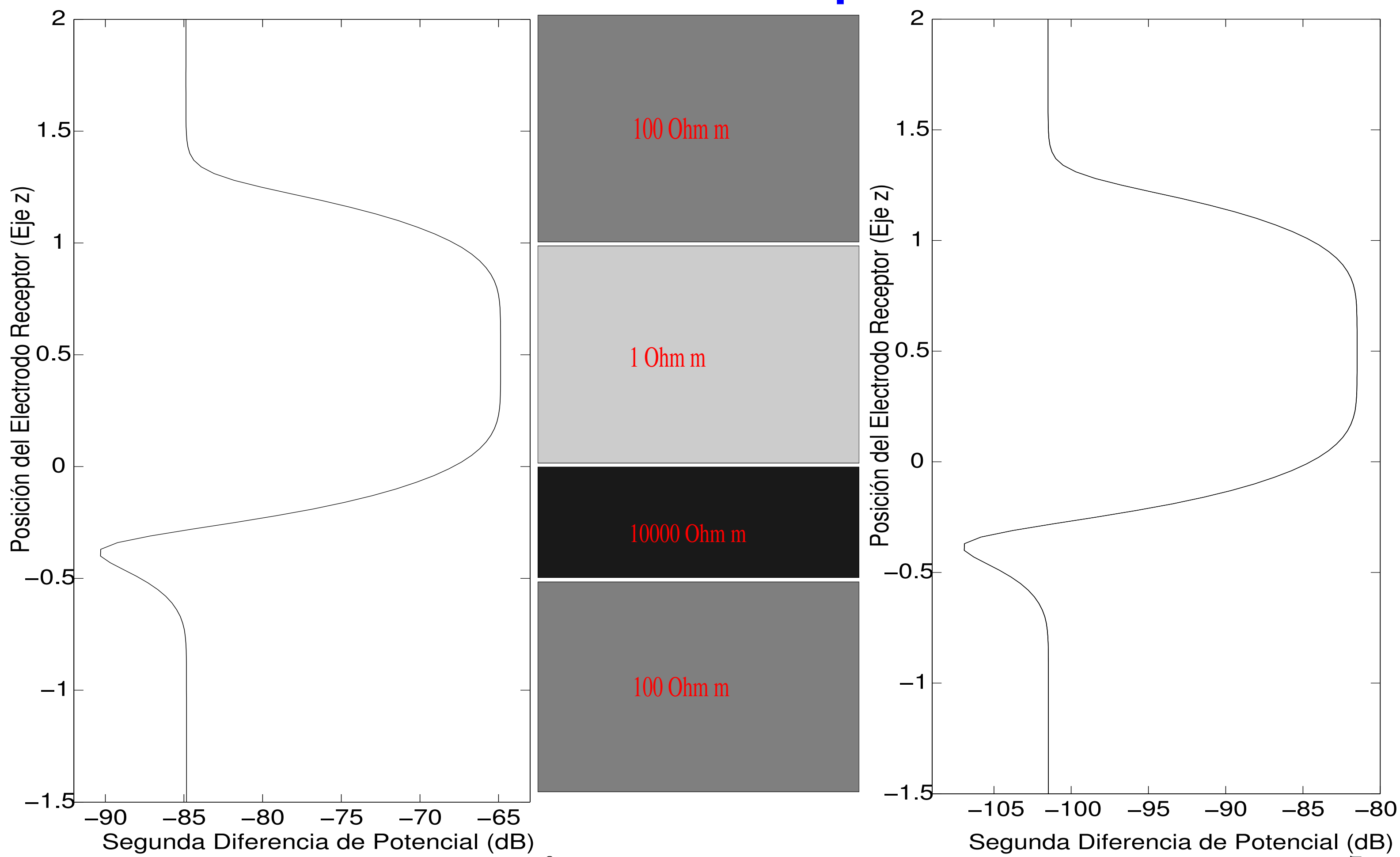
Dominio computacional: VARIOS KILÓMETROS.

Resistividad de los materiales varía en DIEZ órdenes de magnitud (10000000000!!!).

Objetivo: Determinar segunda diferencia de potencial en los electrodos receptores.

RESULTADOS NUMÉRICOS

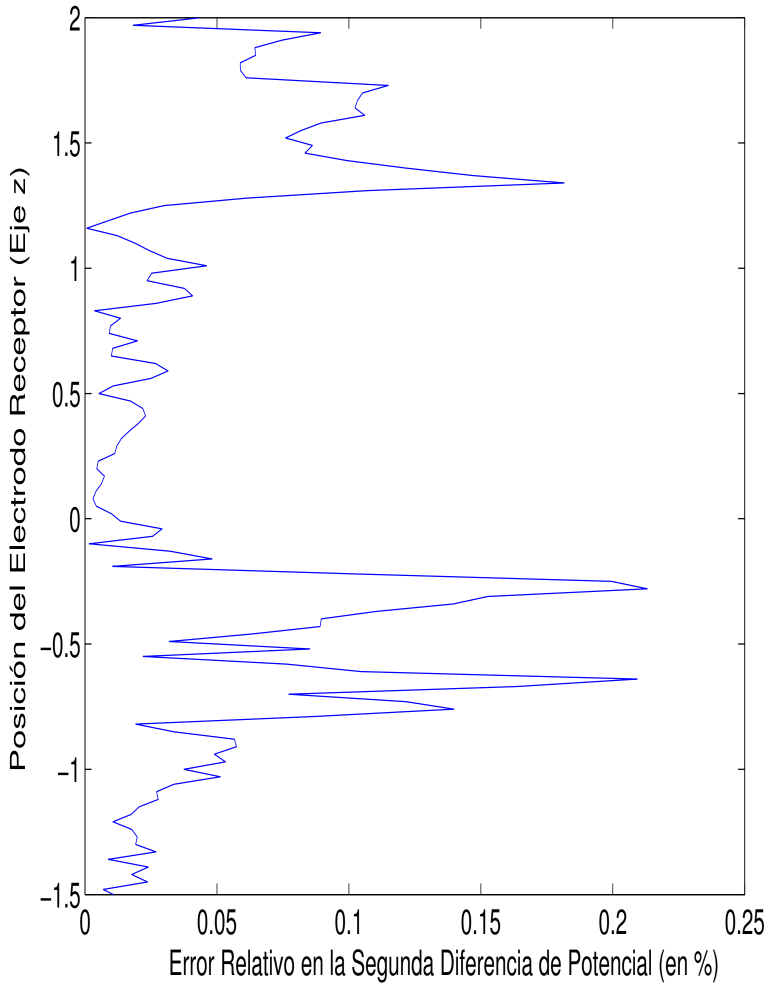
Resultados Obtenidos por el MEF

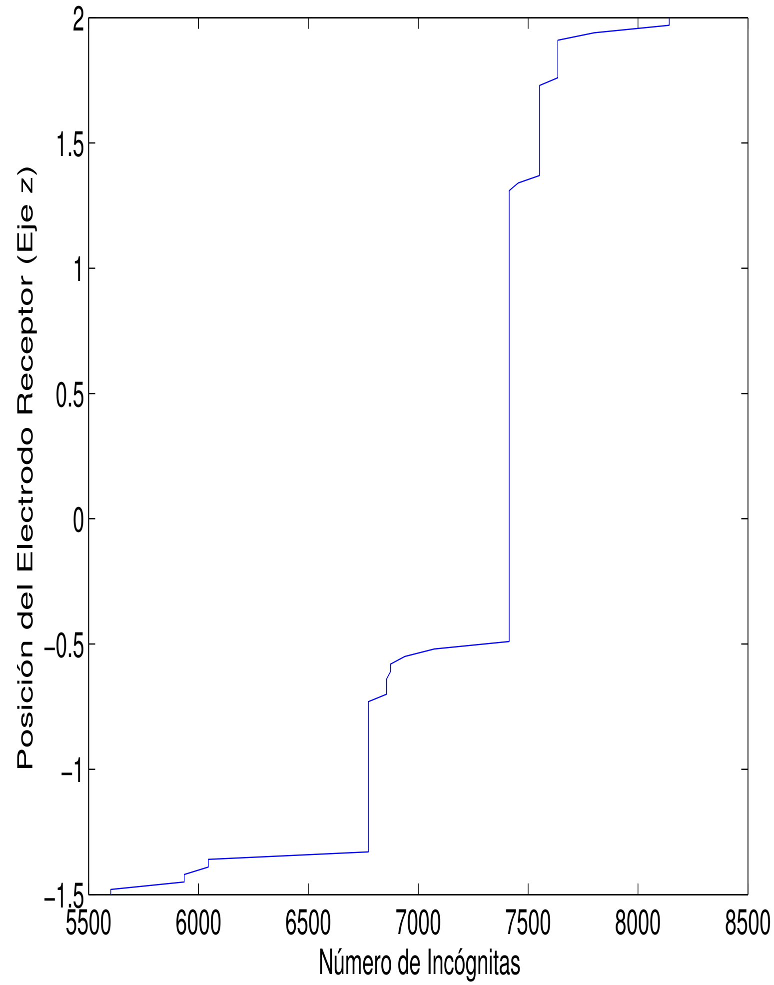


Resistividad de la tubería $= 10^{-6}$ **Resistividad de la tubería** $= 10^{-7}$

RESULTADOS NUMÉRICOS

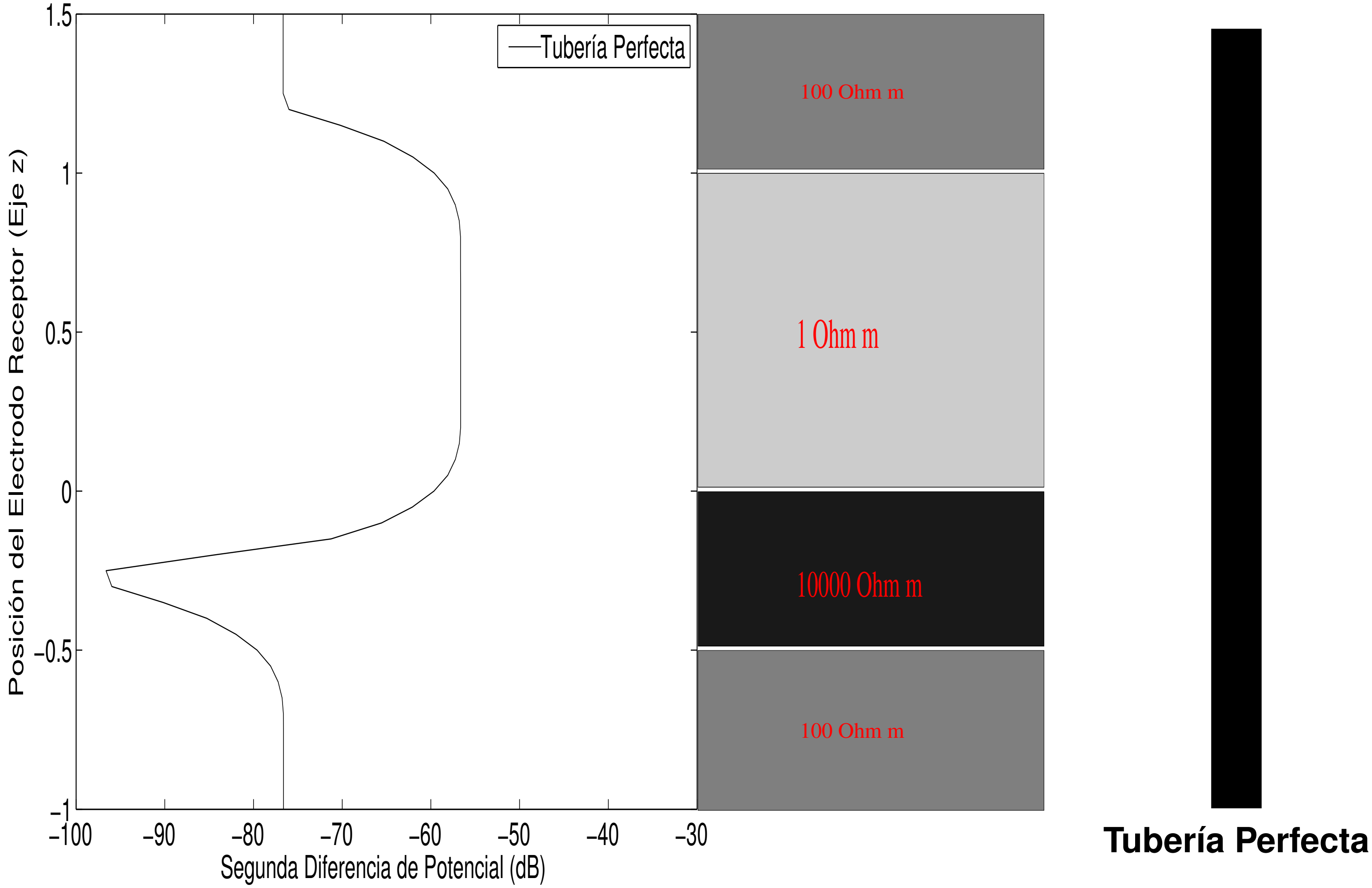
Error Numérico





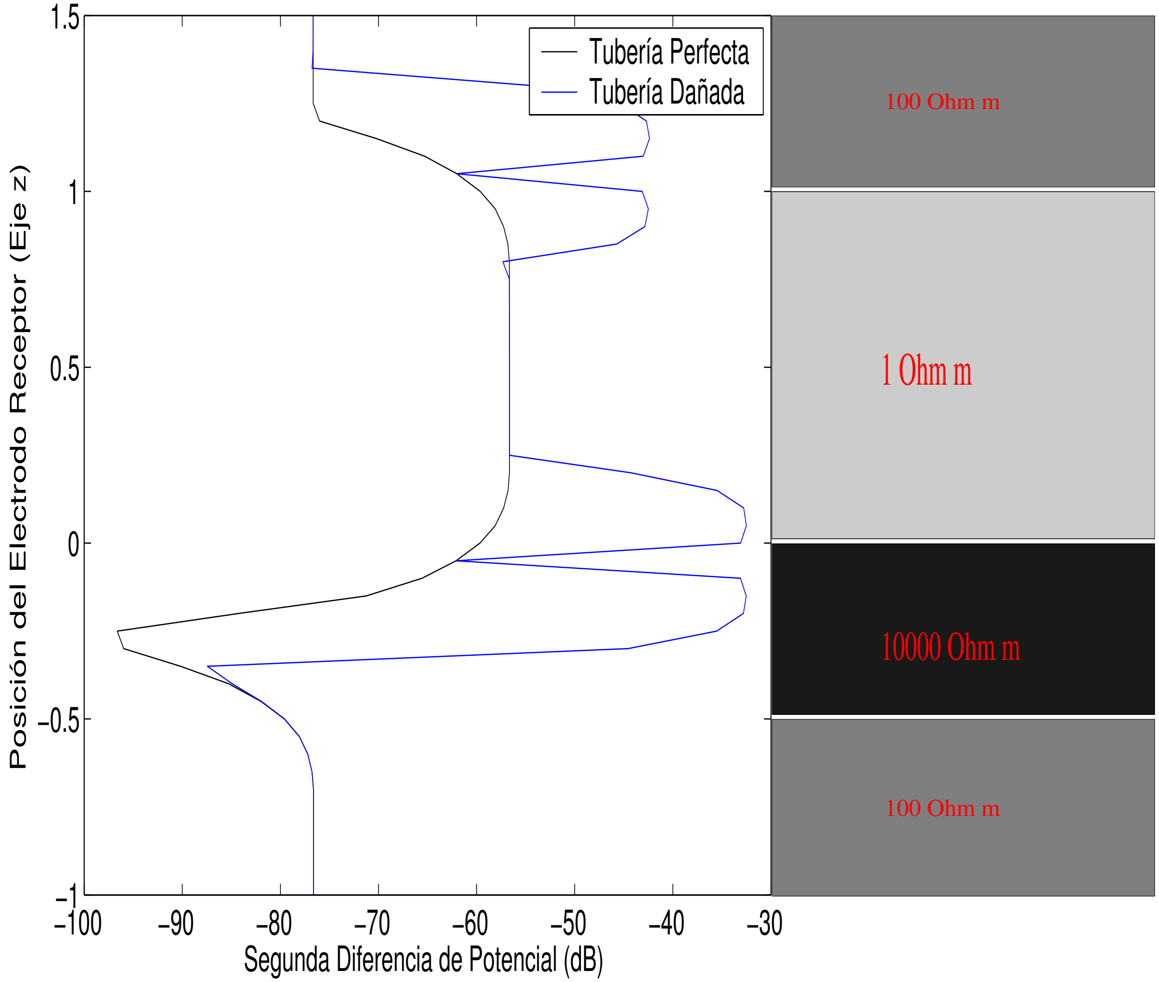
RESULTADOS NUMÉRICOS

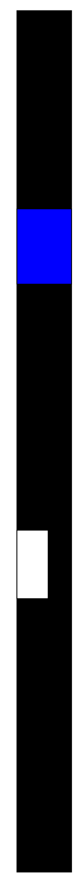
Medición de Resistividad a Través de Una Tubería Perfecta



RESULTADOS NUMÉRICOS

Medición de Resistividad a Través de Una Tubería Dañada

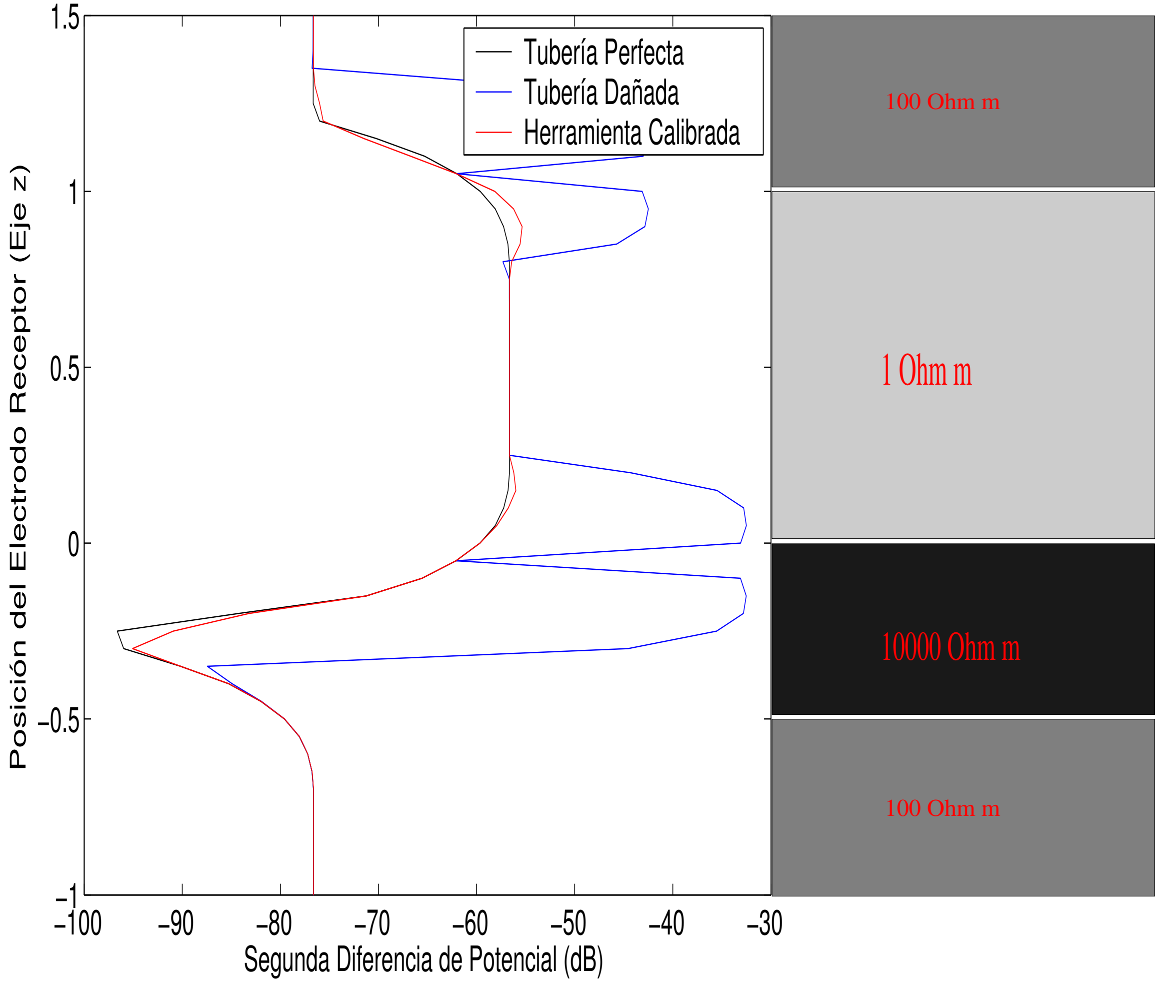


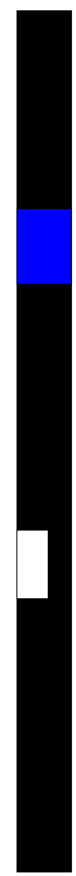


Tubería Dañada

RESULTADOS NUMÉRICOS

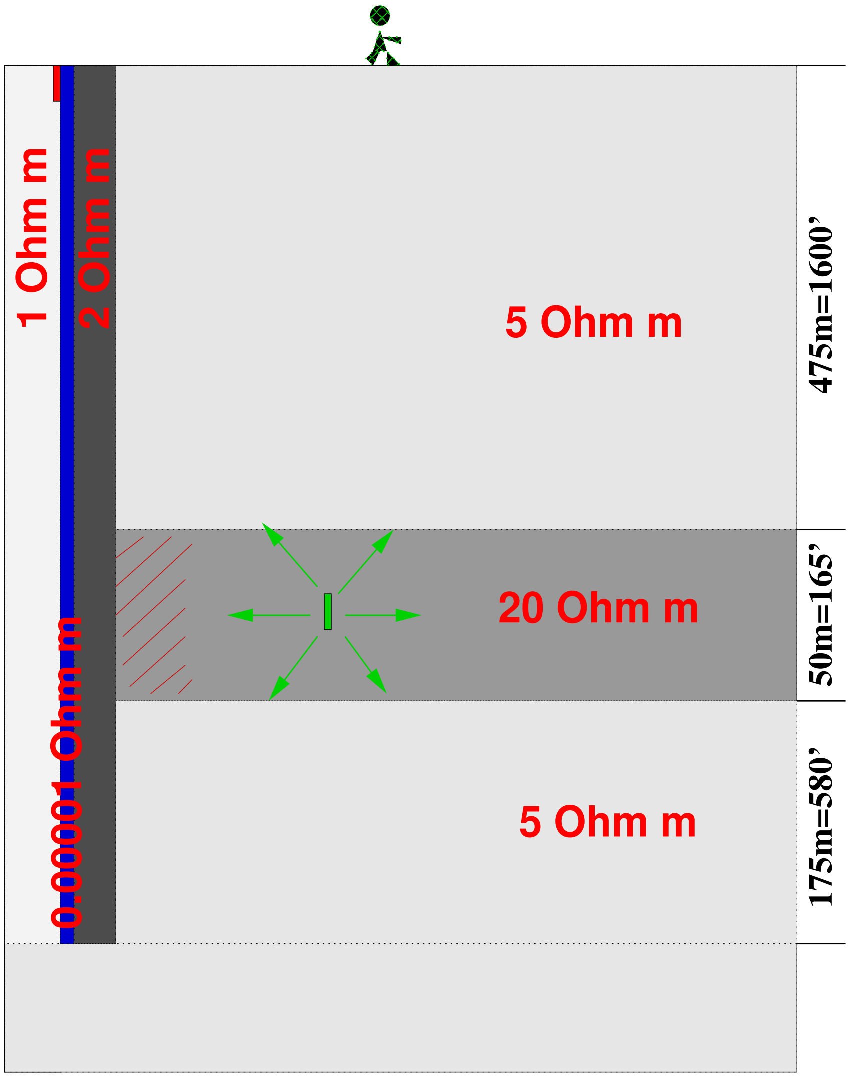
Medición de Resistividad a Través de Una Tubería Dañada





Tubería Dañada

RESULTADOS NUMÉRICOS



5.5'' Borehole radio ; 0.5'' Casing ; 2'' Cement

Problema con simetría axial propuesto por SHELL.

Cinco materiales diferentes.

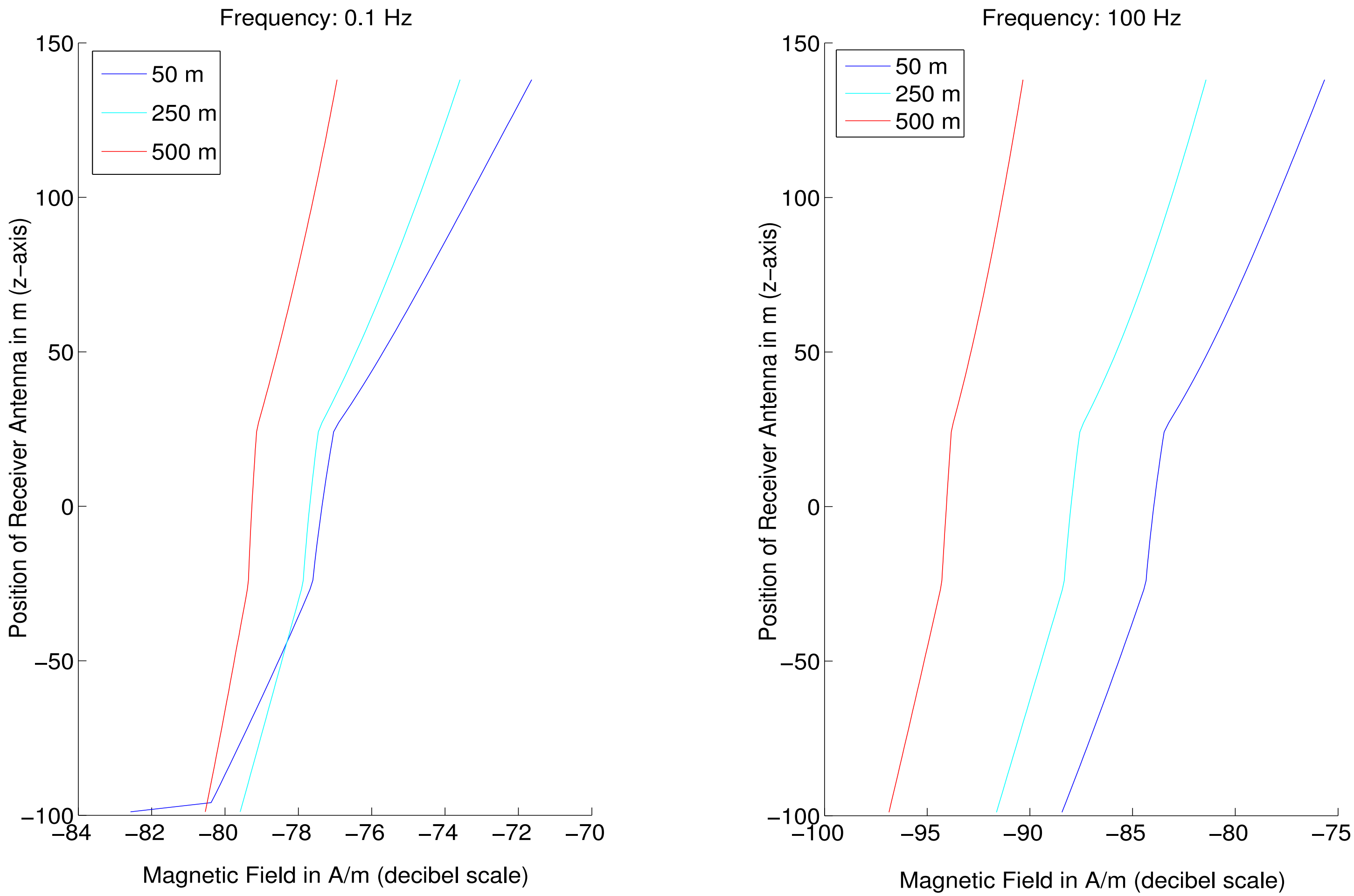
Distintas posiciones de la antena receptora.

Distancia entre el emisor y el receptor: 400-800 metros.

Objetivo: Determinar la primera diferencia de potencial en los electrodos receptores.

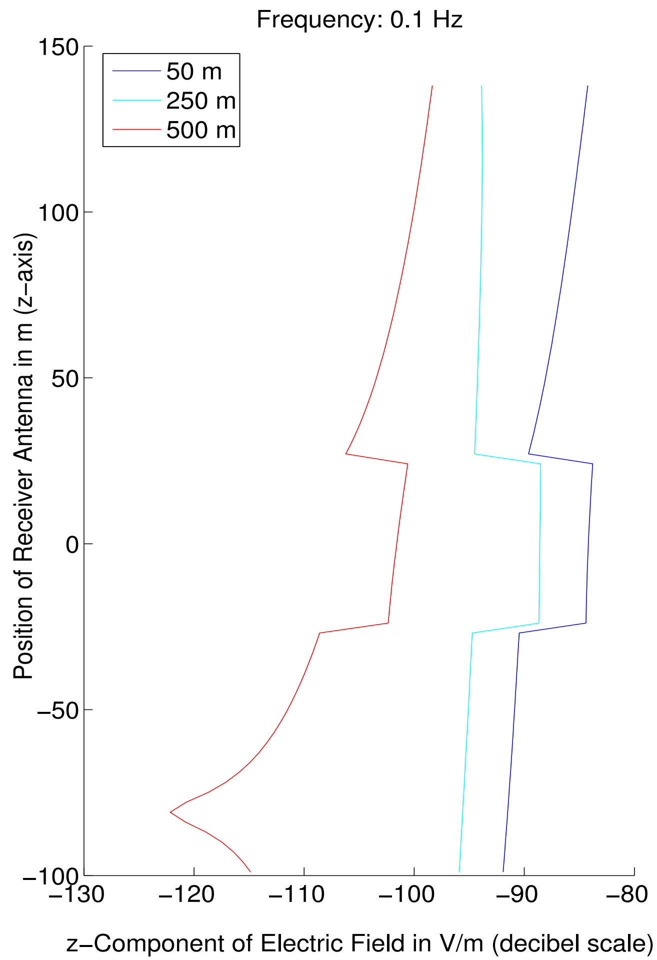
RESULTADOS NUMÉRICOS

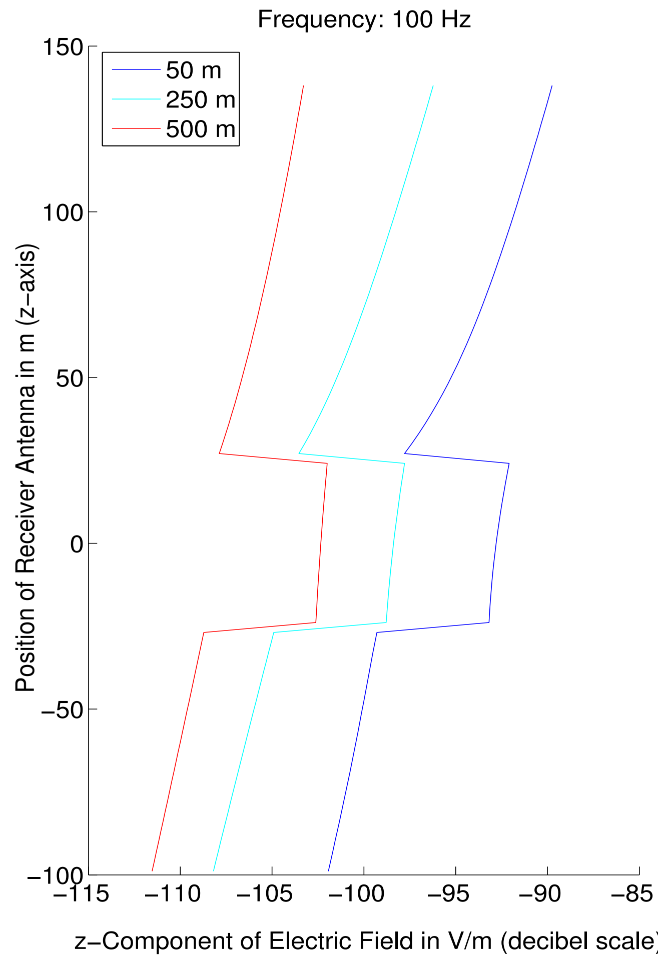
Resultados Obtenidos por el MEF



RESULTADOS NUMÉRICOS

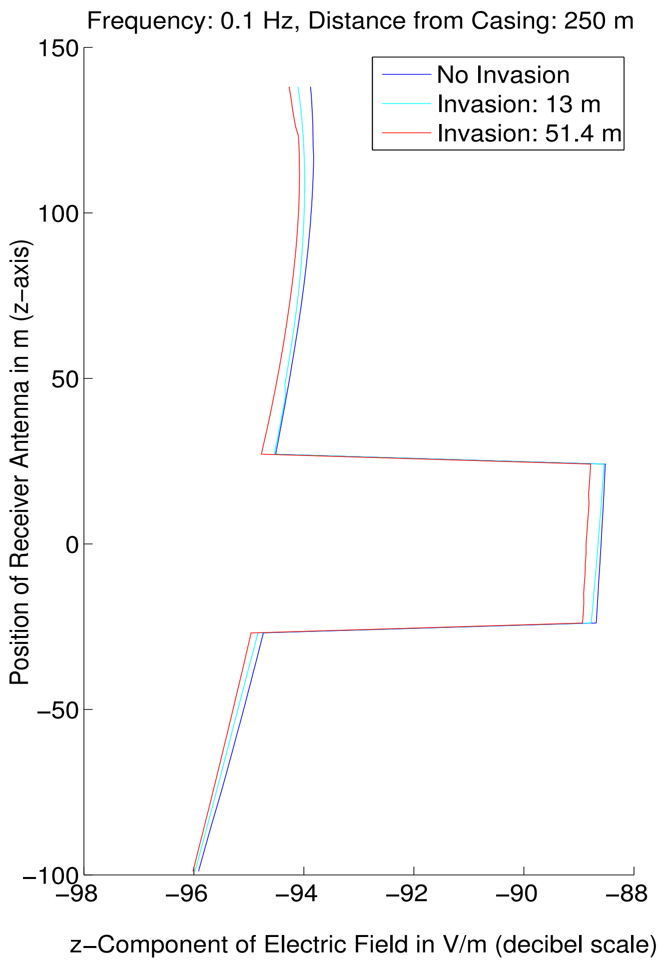
Resultados Obtenidos por el MEF

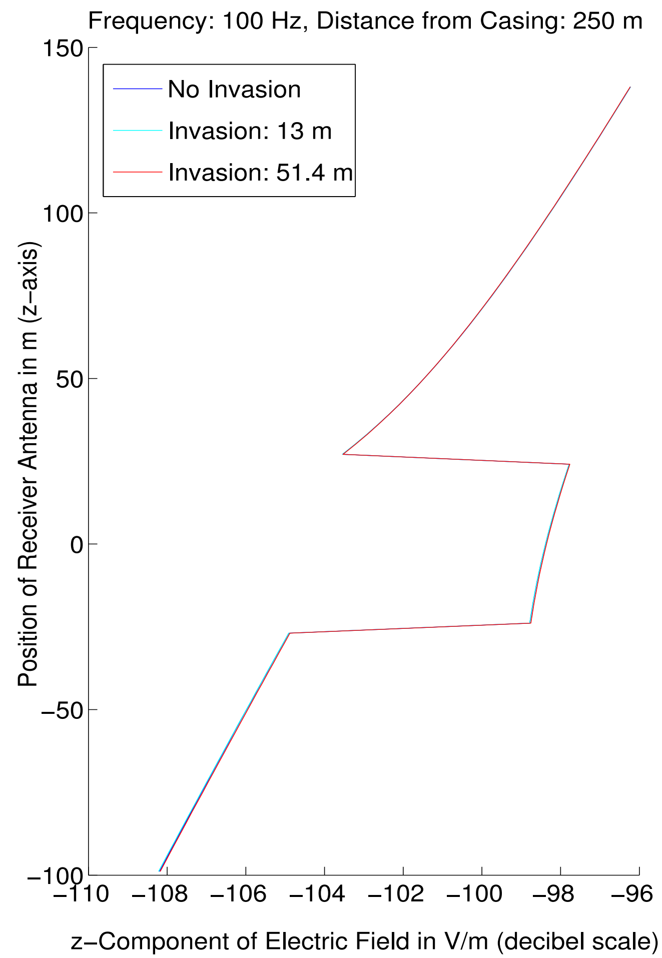




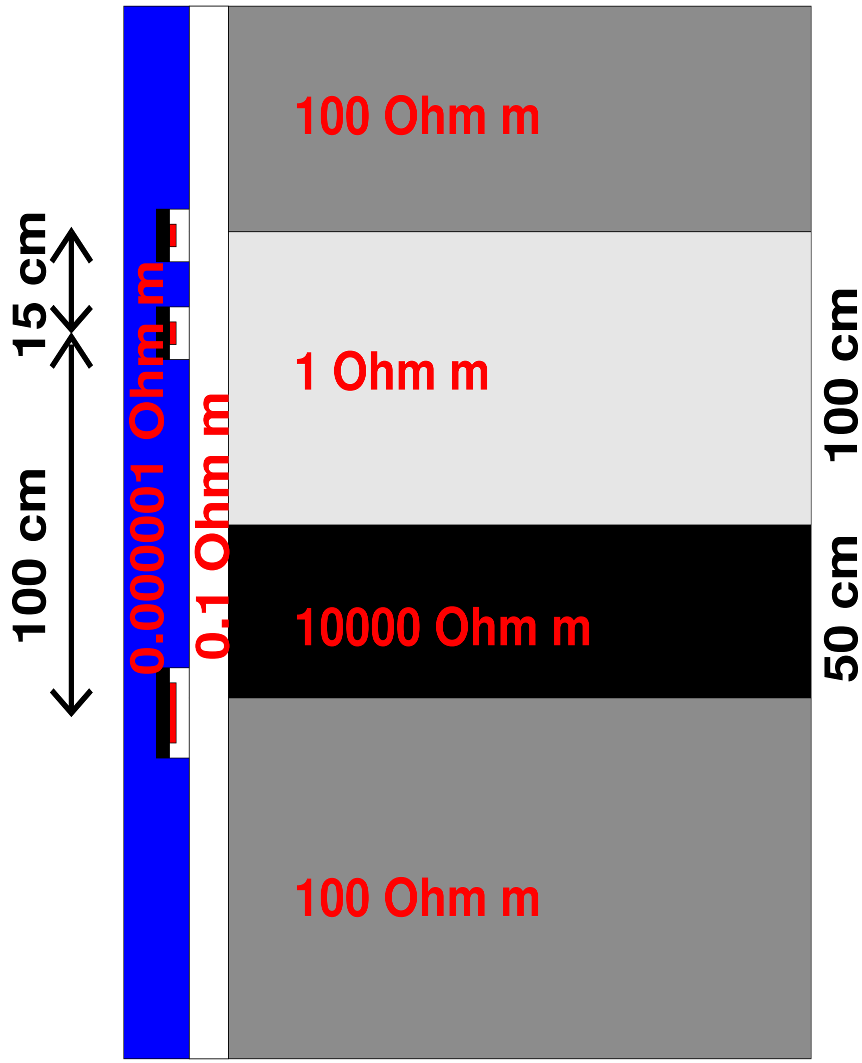
RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados Obtenidos por el MEF

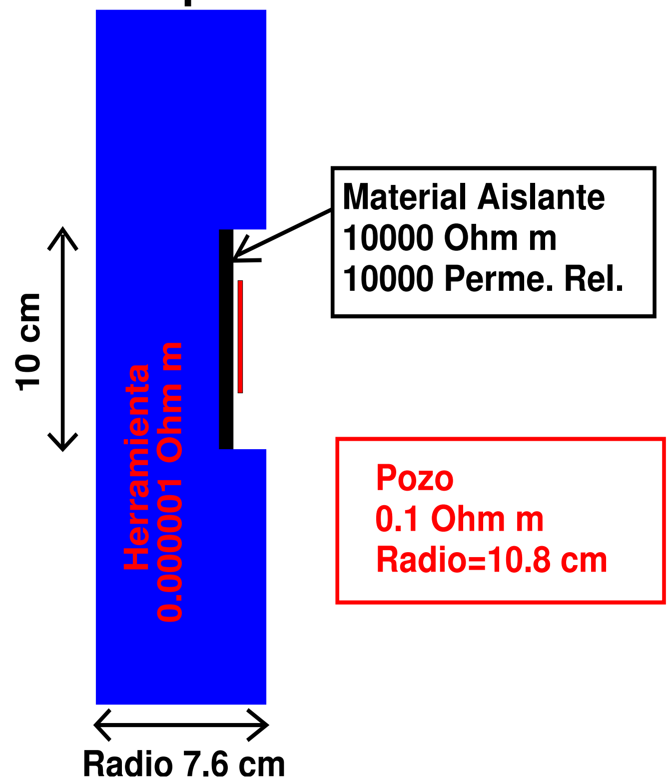




RESULTADOS NUMÉRICOS



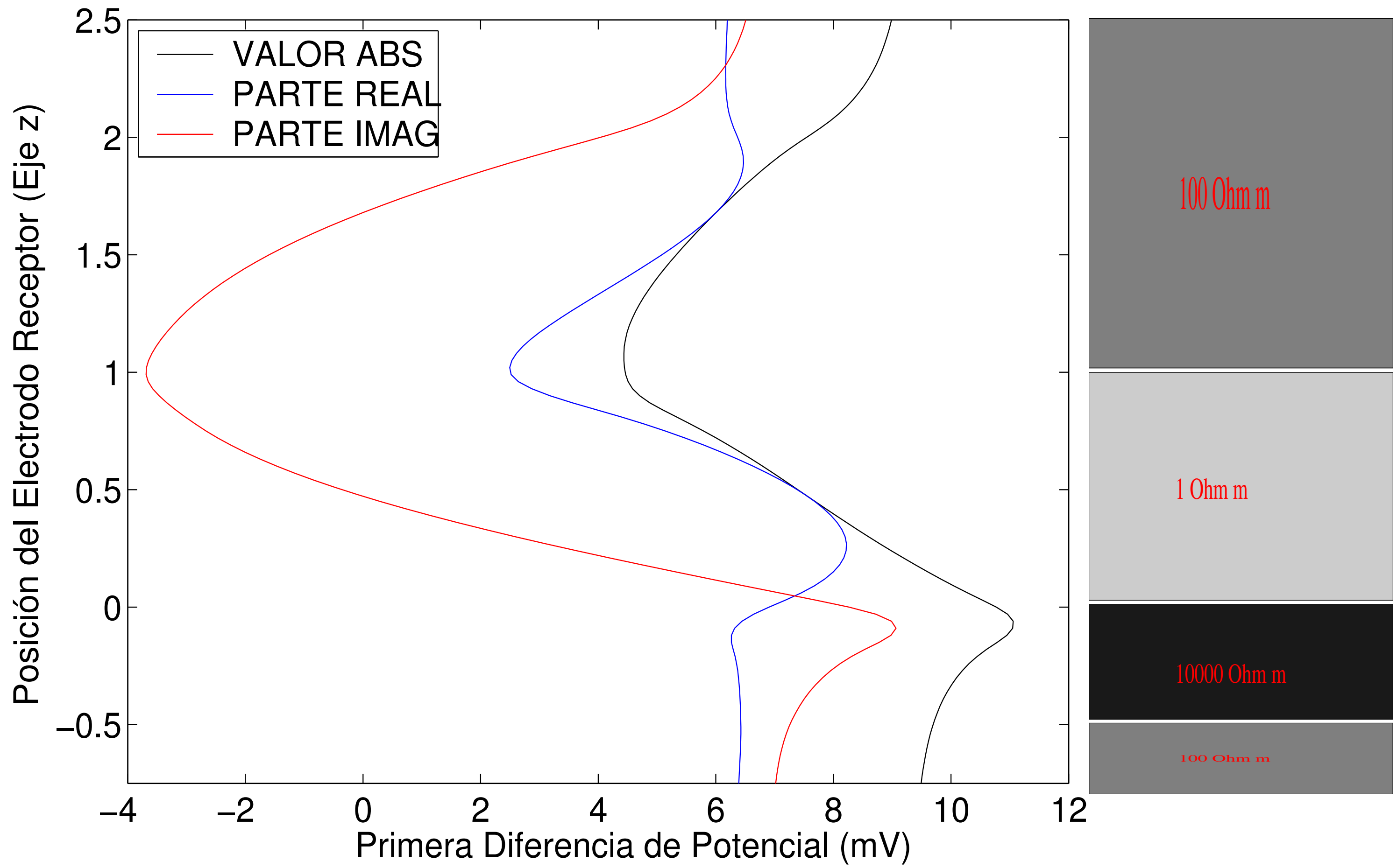
Descripción de las Antenas



Objetivo: Calcular la Primera Diferencia de Potencial en las Antenas Receptoras

RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados Obtenidos por el MEF



Frecuencia: 2 Mhz

CONCLUSIONES

Conclusiones

- **La estrategia automática de refinamientos en hp 'orientada a un objetivo' converge exponencialmente en términos de la cantidad de interés (determinada por el usuario) con respecto al tiempo necesario para resolver el problema.**

- **Hemos simulado herramientas electromágneticas en pozos petrolíferos, garantizando unos niveles de error numérico mínimos.**

Trabajo Futuro

- **Ampliar la estrategia de refinamientos 'orientada a un objetivo' a problemas tridimensionales.**

- **Simular y diseñar herramientas electromagnéticas tridimensionales.**